

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Jovita STARYNINA

**MODERNIZUOJAMŲ VISUOMENINIŲ
PASTATŲ ENERGIJOS VARTOJIMO
EFEKTYVUMO DIDINIMAS TAIKANT
DARNIUS PROJEKTAVIMO METODUS**

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2020

Disertacija rengta 2015–2020 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Leonas USTINOVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Vytautas MARTINAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Nariai:

dr. Tomas BALEŽENTIS (Vilniaus universitetas, informatikos inžinerija – T 007),

doc. dr. Nerija BANAITIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002),

doc. dr. Darius KALIBATAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002),

habil. dr. Edyta Anna PLEBANKIEWICZ (Krokuvos technologijos universitetas, Lenkija, statybos inžinerija – T 002).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2020 m. vasario 17 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2020 m. sausio 16 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2020- 002-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2020

© Jovita Starynina, 2020

j.starynina@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Jovita STARYNINA

ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT IN MODERNIZATION OF PUBLIC BUILDINGS USING SUSTAINABLE DESIGN METHODS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (T 002)

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2015–2020.

Supervisor

Prof. Dr Habil. Leonas USTINOVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Habil. Vytautas MARTINAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

Members:

Dr Tomas BALEŽENTIS (Vilnius University, Informatics Engineering – T 007),

Assoc. Prof. Dr Nerija BANAITIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002),

Assoc. Prof. Dr Darius KALIBATAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002),

Dr Habil. Edyta Anna PLEBANKIEWICZ (Cracow University of Technology, Civil Engineering – T 002).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 17 February 2020**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 16 January 2020.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Europos Sąjunga (ES) užsibrėžė ilgalaikį tikslą iki 2050 m. sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą 80–95 % ES energijos strateginiame dokumente (Energy Roadmap 2050) reikalaujama daugiau dėmesio skirti pastatų energijos vartojimo efektyvumui skatinti, nes Europoje pastatų suvartojimo energija siekia net 40 % visos suvartojamos energijos. Tuo tarpu Direktyvoje 2010/31/ES (Directive 2010) numatyta, jog statomų naujų pastatų nuo 2020 m. gruodžio 31 d. suvartojama energija turi siekti nulines sąnaudas. Ne išimtis yra ir seni visuomeniniai pastatai, kuriuos reikia modernizuoti dėl jų nusidėvėjimo ir neefektyvaus energijos vartojimo.

Darbo tikslas – sukurti senų visuomeninių pastatų modernizavimo sistemos optimizavimo modelį, siekiant padidinti pastatų vartojamos energijos efektyvumą.

Disertaciją sudaro: įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros ir šaltinių sąrašas, autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas ir keturi priedai.

Įvade aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, nurodomas mokslinis darbo naujumas, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pateikti autorės pranešimai konferencijose ir publikacijos, disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje analizuojamos mokslinės literatūros šaltiniuose nurodomos senų visuomeninių pastatų problemos ir galimi modernizacijos sprendimo būdai. Pateikta pastatų energijos naudojimo didinimo priemonių analizė, pastatų atnaujinimo būdai ir galimybės bei BIM technologijos eiga ir jos pritaikymą atliekant pastatų modernizaciją.

Antrajame skyriuje pateikiamas modernizacijos modelis visuomeninių pastatų rekonstrukcijai atlikti. Pateikta baziniai pastatų analizės metodai taikant tokias naujas technologijas: fotogrammetrinio modelio sudarymas, klasifikatoriaus pritaikymas BIM aplinkoje, Optimizavimo modelio algoritmas.

Trečiajame skyriuje patikrinta sukurta metodika bei visuomeninių pastatų modernizavimo technologijos daugiakriteris modelis pritaikant BIM. Optimizavimo modelio algoritmas pritaikytas Radviliškio manevrinio dispečerinio posto (Bokšto g. 13) pastatui modernizuoti atliekant projektavimo darbus. Įvertinti gauti rezultatai ir pateiktos išvados.

Abstract

The European Union (EU) has set a long-term target to reduce Gass emission by 80–95% till 2050. The EU Energy Strategy (Energy Roadmap 2050) calls to focus on energy efficiency in buildings, as it is the largest energy consumer in Europe, counting for almost 40% of total energy consumption. Meanwhile, Directive 2010/31/EU (Directive 2010) establishes a definition which states that new buildings shall be constructed as zero-energy use from the 31st of December 2020. No exception to this definition are old public buildings that need to be modernized due to their depreciation and inefficient use of energy.

The aim of the thesis is to develop optimization model for the modernization of old public buildings by achieving energy efficiency of the buildings.

The dissertation consists of: introduction, three chapters, general conclusions, references, list of author's scientific publications on dissertation topic and four annexes.

In the introductory chapter the research problem, the relevance of the work are discussed, the object of the research is described, the aims and objectives of the work is formulated, the scientific novelty of the work is described. The author's conference reports and publications as well a thesis structure are presented.

The first chapter analyzes and presents the problems of the existing old public buildings and presents possible solutions for modernization. Analysis of the energy efficiency improvement measures of buildings, ways and possibilities of renovation of buildings, and the development of BIM technology and application of this technology in the modernization of buildings are discussed.

The second chapter presents a modernization model for the reconstruction of public buildings. Basic methods of building analysis using new technologies such as: photogrammetric model creation and adaptation it in BIM environment, optimization model for modernization are presented.

The third chapter examines the developed methodology and the multi-criteria model of public building modernization technology with the application of BIM technology. The algorithm of the optimization model has been applied to the Radviliskis maneuver dispatcher station (Boksto str. 13) modernization of the building in design stage. Results of evaluation with conclusions are presented.

Žymėjimai

Santrumpos

2D – dvimatė erdvė (plokštuma) grafiniams primityviems objektams kurti ir iš jų projektuoti kreives bei figūras (angl. *Two Dimensions*);

3D – trimatė erdvė, naudojama kuriant taškų rinkinius, linijų jungtis, kreives, plokštumas ir pan. iš kurių gaunami tūriniai kūnai (angl. *Three Dimensions*);

4D – keturmatė erdvė, kurioje trimatis kūnas dažniausiai atvaizduojamas laiko atžvilgiu (angl. *Four Dimensions*);

5D – penkiamatė erdvė, kuri apima tikslią išlaidų sąmatą;

6D – šešiamatė erdvė, darnaus statinio vystymas, energijos suvartojimas (įskaitant energijos simuliacijas);

ND – statinio valdymas, priežiūra, logistika, energijos vartojimo efektyvumas, gyvavimo ciklo analizė ir galimos kitos modelio dimensijos;

AIM – atributinis informacinis modeliavimas/valdymas (angl. *Asset Information Management*);

BEM – pastatų energijos modeliavimas (angl. *Building Energy Modeling*);

BIM – statinio informacinis modeliavimas (angl. *Building Information Modelling*);

CAD – virtualių arba realių objektų projektavimo būdas naudojant kompiuterines technologijas (angl. *Computer-Aided Design*);

CO₂ – anglies dioksidas (angl. *Carbon dioxide*);
 COPRAS – daugiakriterio kompleksinio proporcingumo sprendimų priėmimo metodas (angl. *Complex Proportional Assessment*);
 EP – Europos Parlamentas;
 ES – Europos Sąjunga;
 Energetinė simuliacija – energetinis pastato modeliavimas;
 GIS – geografinės informacinės sistemos (angl. *Geographic Information System*)
 HN – higienos norma;
 IFC – atviras mainų formatas (angl. *Industry Foundation Classes*);
 IT – informacinės technologijos;
 JAV – Jungtinės Amerikos Valstijos;
 JK – Jungtinė Karalystė;
 LKS 94 – Lietuvos Respublikoje priimta valstybinė koordinačių sistema, priimta 1994 m.;
 LoI – informacijos lygis (angl. *Level of Information*);
 LR – Lietuvos Respublika;
 LST – Lietuvos standartas;
 LST EN – Europos standartas (patvirtintas Lietuvoje);
 LST EN ISO – tarptautinės standartų organizacijos sistemų standartas;
 MCDM –daugiakriteriai sprendimo priėmimo metodai (angl. *Multiple-criteria decision analysis making*);
 NRG – pastato energinio naudingumo nustatymas;
 PIM – projekto informacijos modeliavimas/valdymas (angl. *Project Information Management*);
 PLM – produkto viso gyvavimo ciklo valdymas (angl. *Product (Project) Lifecycle Management*);
 RFI – reikalaujama informacija (angl. *Request for Information*);
 SAW – paprastojo svorių sudėjimo metodas (angl. *Simple Additive Weighting*);
 SBM – vieno pastato modelis (angl. *Single Building Model*);
 SyMAD3 – daugiakriteris sprendimų sintezės metodas, naudojant tris metodus (angl. *Synthesis of Multiple Attribute Decisions using three methods*);
 STR – statybos techninis reglamentas;
 TOPSIS – artumui detaliam taškui metodas (angl. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
1. MOKSLINĖS LITERATŪROS APIE VISUOMENINIŲ PASTATŲ MODERNIZAVIMĄ ANALIZĖ	7
1.1. Energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonių analizė ir parinkimas	8
1.2. Visuomeninių pastatų atnaujinimo būdai ir galimybės	10
1.3. Statybų informacijos modeliavimas analizuojant energijos vartojimo efektyvumą.....	12
1.4. Statinio informacinio modeliavimo evoliucija ir panaudojimo galimybės.....	14
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	19
2. VISUOMENINIŲ PASTATŲ MODERNIZACIJOS MODELIS TAIKANT ENERGIJOS EFEKTYVAUS VARTOJIMO PRINCIPUS IR STATINIO INFORMACINIO MODELIAVIMO TECHNOLOGIJĄ	21

2.1. Visuomeninių pastatų modernizacijos modelio pagrindinių etapų aprašymas.....	22
2.2. Trimačiai skaitmeniniai fotogrammetriniai modeliai.....	25
2.3. Pastatų inventorizavimas ir tyrimai.....	30
2.4. ND parametrinio modelio ir duomenų bazės kūrimas (klasifikatoriai).....	34
2.5. Pastatų energijos simuliacijos modelio kūrimas naudojant aktyvų statinio informacinį modeliavimą.....	37
2.6. Tvaraus efektyvumo vertinimas.....	41
2.7. Optimizavimo modelio algoritmo kūrimas.....	44
2.7.1. Rodiklių reikšmingumo nustatymas.....	52
2.7.2. Pastato konstrukcijų modernizacijos sprendimų sintezės metodas.....	53
2.8. Esamų statinio informacinio modeliavimo technologijų pritaikymas visuomeninių pastatų modernizacijai.....	58
2.9. Antrojo skyriaus išvados.....	60
3. SUKURTO MODERNIZACIJOS MODELIO PRITAIKYMAS	
VISUOMENINIAM PASTATUI	63
3.1. Tiriamojo visuomeninio pastato energijos vartojimo efektyvumo analizė ir modernizacijos sprendimo būdų parinkimas.....	64
3.2. Atskirų pastato atitvarinių konstrukcijų analizė.....	65
3.2.1. Išorinių atitvarinių konstrukcijų fizinės būklės vertinimas.....	65
3.2.2. Vidinių atitvarinių konstrukcijų fizinės būklės vertinimas.....	67
3.3. Pastato atitvarinių konstrukcijų bei inžinerinių sistemų pagrindinių rodiklių nustatymas (energijos simuliacija).....	70
3.3.1. Pastato elementų energijos simuliacijos formavimas.....	72
3.3.2. Efektyviausių variacijos intervalų nustatymas.....	74
3.4. Optimizavimo modelio kūrimas.....	77
3.4.1. Modernizacijos krypties apibrėžimas.....	77
3.4.2. Parinktų rodiklių sąrašo nustatymas.....	85
3.4.3. Konstrukcijų modernizacijos variantų analizė.....	86
3.5. Atliktų analizių lyginimas ir efektyvumo nustatymas.....	92
3.6. Trečiojo skyriaus išvados.....	95
BENDROSIOS IŠVADOS	97
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	99
AUTORĖS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	113
SUMMARY IN ENGLISH	115
PIRIEDAI*	131
A priedas. Radviliškio manevrinio dispečerinio posto (Bokšto g. 13) pastato tyrimo ataskaita.....	131
B priedas. Autorės sąžiningumo deklaracija.....	273
C priedas. Bendra autorių sutikimai teikti publikacijoje skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje.....	275
D priedas. Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	301

* Priedai pateikiami pridėtoje pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the thesis.....	2
The object of the research	2
The aim of the thesis	2
The objectives of the thesis	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	4
Practical value of the research findings.....	4
Defended statements	4
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	5
1. ANALYSIS OF SCIENTIFIC LITERATURE ON PUBLIC BUILDINGS	
MODERNIZATION POSSIBILITIES	7
1.1. Analysis and selection of the measures for energy efficiency improvement.....	8
1.2. Public buildings' renovation opportunities and models	10
1.3. Construction information modeling performing the energy efficiency	
analyses	12
1.4. Evolution and application possibilities of digital modeling	14
1.5. Conclusions and formulation of the objectives	19
2. MODERNIZATION MODEL OF PUBLIC BUILDINGS USING	
ENERGY EFFICIENCY PRINCIPLES AND BUILDING INFORMATION	
MODELING TECHNOLOGY	21
2.1. Description of the main stages of modernization model of public	
buildings modernization model	22

2.2. Making 3D photogrammetric models	25
2.3. Building inventory and research	30
2.4. Development of ND parametric model and database (classifiers)	34
2.5. Development of building energy simulation model using active building information modeling	37
2.6. Evaluation of sustainable efficiency	41
2.7. Development of the algorithm of optimization	44
2.7.1 Determination of significance of indicators	52
2.7.2 Method of the solution synthesis of building structure modernization	53
2.8. Application of the existing building information modeling technologies for public building modernization.....	59
2.9. Conclusions of chapter two	60
3. APPLICATION OF THE CREATED MODERNIZATION MODEL TO THE PUBLIC BUILDING	63
3.1. Analysis of energy efficiency of public buildings under investigation and selection of modernization solutions.....	64
3.2. Analysis of individual building enclosures	65
3.2.1. Evaluation of the physical condition of external barriers	65
3.2.2. Assessment of the physical condition of building interior structures – barrier.....	67
3.3. Determination of basic parameters of building envelope structures and engineering systems (energy simulation)	70
3.3.1. Formation of building energy simulations	72
3.3.2. Identification of the most effective variations	74
3.4. Development of optimization model.....	77
3.4.1. Definition of the direction of modernization	77
3.4.2. Determination of the list of selected indicators.....	85
3.4.3. Analysis of modernization options of the constructions	86
3.5. Comparison of the analyzes and determination of the efficiency	92
3.6. Conclusions chapter three	95
GENERAL CONCLUSIONS	97
REFERENCES	99
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	113
SUMMARY IN ENGLISH.....	115
ANNEXES**	131
Annex A. Building analysis of Radviliskis maneuver dispatcher station (Boksto str. 13).....	132
Annex B. Author's declaration of academic integrity.....	273
Annex C. The co-author's agreements to provide published material in the doctoral dissertation	275
Annex D. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation	301

** The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Ivadas

Problemos formulavimas

Europos Komisijos komunikate „Statybų sektoriaus ir šio sektoriaus įmonių tvaraus konkurencingumo strategija“ (SWD 2012) ES statybos sektorius įvardintas kaip savo veiklos rezultatais darantis didelę įtaką ES ekonomikos raidai, nes sukuria apie 10% bendrojo vidaus produkto ir apie 20 mln. darbo vietų. ES valstybėse nuo 2021m. visi naujai statomi pastatai turi tapti beveik nulinės suvartojamos energijos pastatais (Directive 2010). Europos šalys seniai taiko statinio informacinį modeliavimą (BIM) naujų pastatų statybai (Skaitmeninė statyba 2014). Atlikus įvairių šaltinių analizę nustatyta, kad šiuo metu Lietuvoje nėra taikomas statybos rinkos realijas atitinkantis statinio informacinis modelis, metodologinių visuomeninių pastatų modernizavimo projekto vertinimas, taip pat nėra aiškūs pastato efektyvumo vertinimo kriterijai per visą pastato gyvavimo laikotarpį. Nustatyta, kad bendros matematiškai pagrįstos metodologijos nėra ir užsienyje. Sukurta visuomeninių pastatų modernizavimo vertinimo sistema būtų taikoma tiek Lietuvoje, tiek užsienyje.

Mokslinė disertacijos problema formuluojama įvertinus trūkumus atliekant visuomeninių pastatų modernizavimą: statybos pramonės nevienalytiškumas, standartų trūkumas didinant energijos vartojimo efektyvumą BIM aplinkoje, efektyvios atsinaujinančios energijos integracija atliekant seno pastato

modernizaciją, kokybės standartų trūkumas. Parengta modernizacijos metodika bei daugiakriteris vertinimo modelis padės išspręsti šią problemą. Siūlomoji metodika gali būti taikoma pasitelkiant naujas technologijas: fotogrammetriją ir BIM technologiją.

Darbo aktualumas

Lietuvoje pastatams ir inžinerinei infrastruktūrai sunaudojama apie 50 % visų šalies materialinių investicijų, statybinių medžiagų gamybai ir eksploatuojamiems pastatams bei statiniams sunaudojama apie 50 % visos energijos (Skaitmeninė statyba 2014). Pastatų energetinio naudingumo direktyva ir Energijos vartojimo efektyvumo direktyva, nustato modernizavimo apimčių didinimą, ypač visuomeninės paskirties pastatuose (Direktyva 2012/27/ES, 2012). Europos Parlamentas (EP), formuodamas savo politiką, skiria didžiulį dėmesį pastatų energijos vartojimo efektyvumui, sveikatos ir aplinkos apsaugai, didina finansavimą energijos vartojimo efektyvumui ir skatina didesnę atsinaujinančios energijos vartojimą. EP iki 2020 metų yra užsibrėžęs pasiekti energetikos ir aplinkosaugos tikslų ES vykdomai politikai ir atsižvelgti į visuomeninių pastatų energijos taupymo ir aplinkos apsaugos įgyvendinimo planą.

Šio tiriamojo darbo rezultatai būtų naudojami projektavimo stadijoje, todėl ši modernizacijos metodika gali būti taikoma bet kokiems energijos netausojantiems, seniems pastatams. Sukurta statinio informacinio modeliavimo (BIM) visuomeninių pastatų modernizavimo projekto vertinimo sistema ateityje bus taikoma modernizavimo darbų Lietuvoje ir užsienyje projektavimui bei jų energetinės ir ekonominės naudos pagrindimui.

Tyrimų objektas

Modernizuojamų visuomeninių pastatų energijos vartojimo didinimas taikant optimizavimo modelį skaitmeninių technologijų pagrindu.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – sukurti senų visuomeninių pastatų modernizavimo sistemos optimizavimo modelį, siekiant padidinti pastatų vartojamos energijos efektyvumą.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti keliama uždaviniai:

1. Išnagrinėti literatūroje pateiktus energijos vartojimo efektyvumo didinimo būdus ir įvertinti sprendimų priėmimo efektyvumo naudą taikant BIM technologiją.
2. Suformuoti senų visuomeninių pastatų modernizacijos optimizavimo algoritmą, kad jo pagrindu būtų įgyvendinta pastato vartojamos energijos efektyvumas, taikant BIM technologijos pagrindus.
3. Pritaikyti sukurto skaitmeninio trimačio pastato modelio galimybes pastatų modernizacijai.
4. Atlikti modernizuojamo pastato duomenų analizę taikant optimizavimo modelį. Nustatyti sprendimų efektyvumo naudą taikant BIM technologijos pagrindus.

Tyrimų metodika

Darbe remtasi užsienio ir Lietuvos mokslininkų publikacijomis, tyrimais, programinių įrangų duomenimis, įstatymais, reglamentuojančiais statybą ir projektavimą, techniniais statybos reglamentais, BIM standartais. Modernizacijos sprendimų priėmimui taikoma: optimizavimo modelis pagrįstas daugiakriterine analize kur efektyviausio varianto įvertinimui taikoma sprendimo priėmimo medžio metodas. Remtasi statybos pramonės pateiktais informaciniais leidiniais, Lietuvos ir užsienio statistiniais duomenimis.

Apžvelgta BIM programinė ir techninė įrangos informacija kuri buvo pritaikyta disertacijos tiriamojo objekto skaitmeninio trimačio modelio sukūrimui.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sukurtas senų visuomeninių pastatų energijos vartojimo efektyvumo didinimo modernizacijos modelis.
2. Sukurtas atvirkštinio pastato energijos vartojimo uždavinys.

3. Parengta visuomeninių pastatų modernizacijos technologija taikant optimizavimo modelio algoritmą, kuri yra integruojama į BIM technologiją.
4. Sukurtas optimizavimo modelis, kuriuo galima modernizuoti pastatus gerinant jų energetinį naudingumą ir išlaikant tvaraus ir ekologiško pastato gyvavimo principus taikant BIM technologiją.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurtas modernizacijos algoritmo modelis BIM aplinkoje gali būti taikomas planuojant arba rengiant pastatų projektus, atliekant pastatų modernizacijos darbus. Šie tyrimo rezultatai naudingi investicinių projektų rengėjams, projektuotojams ir statytojams, statinio savininkams, nes sistema sukuria daug alternatyvių rekomendacijų ir parenka racionaliausius variantus konkrečiam saugaus ir sveiko būsto atvejui.

Ginamieji teiginiai

1. Pritaikius daugiakriterių sprendimo priėmimo metodų kompleksą ir atsižvelgus į naujų technologijų taikymo naudą, galima sukurti optimizavimo modelį, kuris skirtas senų visuomeninių pastatų modernizacijai.
2. Naudojant optimizavimo modelį, kuris paremtas BIM ir daugiakriteriu sprendimo priėmimo metodu, galima gauti efektyviausią modernizacijos variantą, kuris atitiktų pastato energinio efektyvumo reikalavimus.
3. Išanalizavus pastatų modernizacijos taikymo būdus ir BIM naudą, galima sukurti automatizuotą pastatų modernizacijos sprendimų priėmimo algoritmą.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema paskelbti 7 moksliniai straipsniai. Vienas straipsnis yra įtrauktas į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę (Ustinovičius *et al.* 2017); du straipsniai yra įtraukti į SCOPUS duomenų bazę (Ustinovičius *et al.* 2018, Cepurnaite *et al.* 2017); du straipsniai paskelbti kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose (Rasiulis *et al.* 2015, Ustinovičius *et al.* 2015), vienas straipsnis –

recenzuojamoje Lietuvos konferencijos medžiagoje (Kontrimovičius *et al.* 2018), vienas straipsnis – recenzuojamoje Lietuvos konferencijos medžiagoje (Sarynina *et al.* 2019). Atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti keturiuose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- ◆ Tarptautinėje konferencijoje „*2nd International Joint Conference on Innovative Solutions in Construction Engineering and Management: 16th Lithuanian–German–Polish colloquium and 6th meeting of EURO working group Operational Research in Sustainable Development and Civil Engineering 24 May – 2nd International Workshop on flexibility in sustainable construction, ORSDCE 2017*“ 2017 m. balandžio 24–26, Poznanė, Lenkijoje;
- ◆ 21-oji jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“, sekcijoje „Statyba“, 2018 m. balandžio mėn., Vilniuje;
- ◆ Tarptautinėje konferencijoje „*29th European Conference on Operational Research*“ 2018 m. liepos 8–11 d., Ispanijoje, Valensijoje;
- ◆ Tarptautinėje konferencijoje „*17th Colloquium Sustainable Decisions in Built Environment and Meeting of EURO Working Group OR in Sustainable Development and Civil Engineering*“ 2019 m. gegužės 15 d., Vilniuje.

Tyrimo rezultatai buvo pristatyti 2019 m. kovo 7 dieną seminare Balstogės universitete, Lenkijoje.

2017 m. buvo atlikta stažuotė Danijoje Aalborg universitete. Stažuotės metu surinkta informacija apie BIM diegimą.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros ir šaltinių bei autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba ir keturi priedai.

Mokslinės literatūros apie visuomeninių pastatų modernizavimą analizė

Šiame skyriuje analizuojama ir pristatoma senų visuomeninių pastatų problematika. Įvertinamos pastatų energijos vartojimo efektyvumo didinimo galimybės ir pateikiami būdai visuomeninių pastatų modernizacijai įgyvendinti. Taip pat pristatomos visuomeninių pastatų atnaujinimo galimybės taikant naujas skaitmenines technologijas (BIM). Pateikiama BIM evoliucija ir panaudojimo galimybės, ne tik naujai projektuojamiems pastatams bei statiniams, tačiau bandoma įtraukti automatizuotus procesus į visą statinio valdymo sistemą. Pristatomos sąsajos tarp statinio informacijos modeliavimo ir statinio energijos emisijos kontroliavimo taikant automatizuotas analizes.

Atlikus užsienio autorių literatūros analizę, pastebėta jog šiuolaikinių skaitmeninių technologijų (BIM) panaudojimas statybos bei vadybos moksliniuose leidiniuose nurodomas kaip populiariausias, tačiau šių technologijų taikymas atliekant senų pastatų modernizaciją vis dar yra menkai tyrinėtas. Pirmame skyriuje pristatomos pastato modernizacijos galimybės statinio informacinio modeliavimo aplinkoje, pateikiami šio proceso trūkumai ir privalumai.

Įvertinus visuomeninių pastatų atnaujinimo galimybes ir poreikį bei BIM reikšmę modernizacijai formuluojami disertacijos uždaviniai.

Skyriuje nagrinėjama tema autorė kartu su bendraautoriais paskelbė tris publikacijas (Rasiulis *et al.* 2015; Ustinovičius *et al.* 2015; Čepurnaitė *et al.* 2017).

1.1. Energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonių analizė ir parinkimas

Seni pastatai naudoja daug išteklių, yra brangūs išlaikyti ir eksploatuoti. Pasiiekti, kad pastatų energijos vartojimas visiškai atitiktų tvaraus ir ekonomišką namo principą, yra pastatų projektavimo, statybos ir eksploatavimo praktika, siekianti padidinti našumą ir sumažinti energijos sąnaudas, atliekų kiekį, išlaidas per statinio gyvavimo ciklą, sunaudoti mažiau išteklių ir daryti kuo mažesnę neigiamą poveikį aplinkai (Wang, Adeli 2015; Žėkas *et al.* 2014). ES strateginiuose energijos dokumentuose primygtinai reikalaujama daugiau dėmesio skirti energijos vartojimo efektyvumo didinimui pastatų valdymo sektoriuje, nes beveik 40 % visos energijos Europoje yra suvartojama neefektyvių pastatų (European Commission 2011, 2014; Energy Roadmap 2050; Directive 2010).

Atsižvelgiant į statybos medžiagas, iš kurių buvo pastatytas statinys, ir jų klimato sąlygas, kurios daro įtaką pastatui, statiniai yra klasifikuojami pagal jų naudojimo paskirtį skiriant gyvavimo trukmę metais.

Pastato gyvavimo trukmė priklauso nuo to kaip statinys buvo eksploatuojamas, kokios buvo panaudotos jam medžiagos ir nuo tinkamų bei laiku atliekamų statybos priežiūros bei remonto darbų.

Pastatų modernizacijos technologijos pritaikymui yra svarbūs pastatų gyvavimo ciklo etapai, kurie leidžia ilginti pastato eksploatacijos laiką, pagerinti konstrukcijų būklę, sumažinti pastato energijos sąnaudas bei atliekų kiekius. Taikant tam tikras pastatų modernizacijos technologijas galima sumažinti statybos ir eksploatacijos išlaidas.

Pastato modernizacijos yra šie etapai (Ignatavičius *et al.* 2012):

- modernizacijos technologija – nusakomas rekonstrukcijos ir remonto tikslingumas, ardymo galimybės, konstrukcijų keitimo būdai ir jų stiprinimo galimybės;
- pastato atraminių konstrukcijų nusidėvėjimo nustatymas ir pastato laikančiųjų konstrukcijų stiprinimo būdai;
- šiuolaikinių inžinerinių sistemų atnaujinimo technologijos, jų pritaikymas;
- pastatų apšiltinimo variantai.

Tačiau gana sudėtinga susieti šiuos etapus atliekant senų pastatų modernizacijos procesą, nes teisiniuose dokumentuose nėra nurodyta, kaip turėtų būti atliekamas tinkamų alternatyvų parinkimas siekiant gauti atitinkamą pastato

energijos klasę po modernizacijos. Kad būtų sukurtas ryšys su teisinių reikalavimų duomenų baze, sprendimų priėmėjui turi būti suteikiama galimybė pasirinkti aukščiausios kokybės medžiagų variantą, ekonomiškiausią ir ekologiškiausią energijos taupymo būdą, kuris atitiktų dabartinius teisinius reikalavimus (Sun *et al.* 2016).

Statybos sektorius turi siekti beveik nulinės energijos pastatų statybos, taikant naujas technologijas ir savo darbo praktika. Šiuo metu taikomi statybos dabo metodai, dideli įmonių skaičiai ir reliatyvus kokybės standartų laikymasis, riboja didelių energijos vartojimo efektyvumo didinimo investicijų ir veiksmingos atsinaujinančių energijos šaltinių taikymo atliekant statybos darbus. Tyrimai parodė, kad norint prognozuoti pastatų energijos suvartojimą reikia į tai atsižvelgti jau projektavimo metu (Mahdavi, Tahmasebi 2015, Martinaitis *et al.* 2015^a).

BIM yra bendradarbiavimo būdas, pagrįstas skaitmeninėmis technologijomis, kurios yra lengviau ir efektyviau pritaikomos jau projektavimo stadijoje (Bryde *et al.* 2013). Skaitmeninis statinio modelis yra taikomas visam statinio gyvavimo ciklui, valdant informaciją nuo projektinių pasiūlymų iki statinio pastatymo ir priežiūros (Jung, Joo 2011). BIM pagrįsti procesai daugiausiai naudojami naujiems pastatams ir infrastruktūrai. Tačiau juos sėkmingai galima taikyti ir rekonstrukcijos/renovacijos projektuose, kur įmanoma panaudoti papildomas informacijos šaltus, tokius kaip lazerinis skenavimas esamam objektui įvertinti, bei greitai energijos ir ekonominio efektyvumo įvertinimo analizė (Barlish, Sullivan 2012; Lee *et al.* 2015). Daugiausiai BIM taikoma kuriant naujus pastatus, tačiau mažai naudojama jau esamiems pastatams atliekant jų priežiūrą, taikant modernizacijos procesus (Merschbrock, Figueres-Munoz 2015). Šia tema Volk *et al.* (2014) pristato daugiau nei 180 publikacijų apžvalgą. Rezultatai rodo menką BIM technologijų taikymą esamiems pastatams (Gu, London 2010).

Šiuo atžvilgiu BIM technologijos sukuria daugiau statybos, energetikos ir programinės įrangos pramonės sinergijos galimybių (Fan *et al.* 2014). BIM technologija apima ne tik projektavimo procesus, tačiau ir įvairius posistemius kaip antai: statybos kainos įvertinimas pagal suprojektuotą pastato modelį kai apskaičiuojamos medžiagos (kaina, kiekis, ilgaamžiškumas) ir pan. (Migilinskas *et al.* 2013). Nepaisant spartaus technologijų tobulėjimo ir statybos standartų kaitos, iššūkių atsiranda dėl proceso automatizavimo nebuvimo (nuo planavimo iki pastato valdymo) ir menko BIM technologijos panaudojimo esamų pastatų modernizacijos darbams.

Užsakovai, vartotojai, statytojai ir valdžios institucijos turi bendradarbiauti ir ieškoti sprendimų, kurie skatintų patrauklius pasiūlymus pastatų savininkams ir pašalintų kuo daugiau kliūčių. BIM pagrįsto energijos vadybos modelio panaudojimas ankstyvose pastato gyvavimo ciklo stadijose užtikrina geriausių energijos vartojimo efektyvumo didinimo sprendimų pasirinkimą, o tai padeda sumažinti senų pastatų išmetamo CO₂ kiekį. Pastatų atnaujinimo proceso

skaitmenizavimui reikalingas tarpdisciplininis požiūris. Priemonės, kurios turi būti integruotos ir valdomos pradiname projektavimo etape, apima architektūrinių ir konstrukcinių, energijos tiekimo priemonių, technologinių statybos procesų ir įvairių duomenų analizės priemonių integravimo sprendimus. Pastatų atnaujinimo proceso objektai yra esami neefektyvūs visuomeniniai pastatai. Todėl priimant sprendimus ir optimizuojant darbus turi būti aktyvus užsakovo bei turto valdytojo bendradarbiavimas.

1.2. Visuomeninių pastatų atnaujinimo būdai ir galimybės

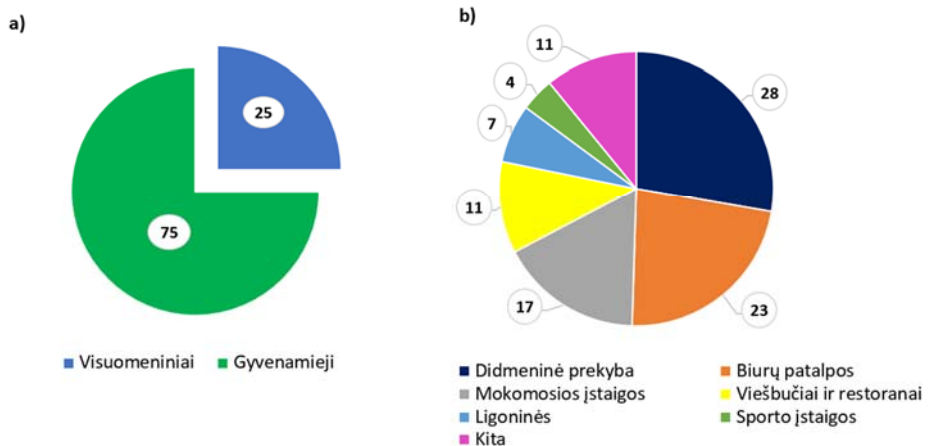
Norint sumažinti išeikvojamos pastatų energijos intensyvumą, pirmiausia reikia sumažinti energijos poreikius. Tai reiškia pastato fasado ir jo šiluminės kokybės gerinimą jį atnaujinant ir šiltinant. Taip sumažinami pastato energijos poreikiai. Modernizacija paprastai atliekama atnaujinant pastato fasadą, apšiltinant išorines sienas šilumos izoliaciją arba jau esamą izoliaciją pastorinant. Pirmojo aukšto, viršutinio aukšto lubų ir stogo šilumos kokybę taip pat galima pagerinti didinant jų šilumos izoliacijos savybes (Chwieduk 2017).

Pastatų valdymo principai turi įtakos renovacijos tempui ir energijos taupymo priemonių parinkimui, siekiant pagerinti pastatų energijos vartojimo efektyvumą ir gyvavimo trukmę. Sprendimas atlikti detalią pastato renovaciją ypač sudėtingas ir nestruktūrizuotas dėl įvairių pastato suinteresuotųjų šalių prieštarų lūkesčių, inžinierių siūlomų sprendimų įvairovės ir netikrumo dėl numatomos renovacijos veiklos ekonominės ir aplinkosauginės naudos. Atlikta analizė Europos Sąjungoje “Europos pastatai po mikroskopu” (Europe’s building 2011) pateikė duomenis dėl užstatytos teritorijos Europoje (1.1 pav.). Biurai ir didmeninės bei mažmeninės prekybos pastatai sudaro didžiausią dalį daugelyje šalių (Europe’s building 2011). Esamų pastatų, kuriems reikia atnaujinimo, skaičius pateisina modernizacijos modelio, optimizuojančio pastato gyvavimo trukmę po atnaujinimo proceso, poreikį (Rodrigues *et al.* 2018).

Šiuo metu visuomeniniams pastatams trūksta dėmesio dėl politikos, kuria reikalaujama, kad viešasis sektorius rodytų pavyzdį, energijos suvartojimo sferoje iki 2018 metų pabaigos buvo reikalaujama, kad visų naujų šio sektoriaus pastatų energijos vadybos standartai būtų beveik nuliniai, o sektoriaus renovacijos rodiklis būtų ne mažesnis kaip 3 % (European Commission 2011).

Daugybė esamų Europos statinių (daugiau nei 40 proc.) yra pastatyta iki 1960 m (European Commission 2011). ES yra įsipareigojusi sukurti tvarią, konkurencingą, saugią ir nuo iškastinio kuro nepriklausančią energijos sistemą. ES energijos strategijos nuostatose ir 2030 m. klimato ir energetikos politikos strategijoje nustatyti ES įsipareigojimai ne vėliau kaip 2030 m. dar labiau

sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį bent 40 %, palyginti su 1990 m., padidinti suvartojamos atsinaujinančių išteklių energijos dalį, taip taupant energijos kiekį ir didinant Europos energetinį saugumą, konkurencingumą ir tvarumą (Directive 2018).



1.1 pav. Visuomeniniai pastatai Europoje, % (Europe's building 2011): a) EU pastatai; b) visuomeninių pastatų kategorijos

Fig. 1.1. Public buildings in Europe, % (Europe's building 2011): a) EU buildings; b) categories of public buildings

Seniems pastatams reikia didelių energijos sąnaudų. Jie paprastai sunaudoja daugiau energijos dėl žemų eksploatacijos savybių, nei nauji pastatai. Norint, kad pastatai būtų aukšto energetinio naudingumo ir atsižvelgus į klimatą reaguojančias išmaniąsias sistemas, svarbu atkreipti dėmesį į aplinkos parametrus ir jų poveikį aplinkai (Habibi 2017). Statinio informacinis modeliavimas gali atlikti pagrindinį vaidmenį analizuojant ir nustatant esamų pastatų energijos suvartojimą. Tai darytų didelę įtaką energetikos įverčių tikslumui nustatyti ir padėtų pritaikyti geriausias modernizacijos alternatyvas. Kadangi pastato BIM modelis yra tikslus, virtuali realaus pastato kopija, turinti atitinkamos informacijos, tad jis gali būti taikomas kaip įvertinimo įrankis numatant modernizacijos priemonių energetinį naudingumą, sukuriant esamo pastato optimizuotą modelį, taikant alternatyvas, analizuojant ir lyginant šių alternatyvių pastatų eksploatacines ir ekonomines savybes (Ma *et al.* 2012; Tobias, Vavaroutsos 2009), atlikti simuliacijas. BIM taip pat yra laikomas kaip procesas ir atitinkama technologija, kuria siekiama pagerinti projekto valdymą nuo jo pradžios iki eksploataavimo/priežiūros efektyvumo (Volk *et al.* 2014).

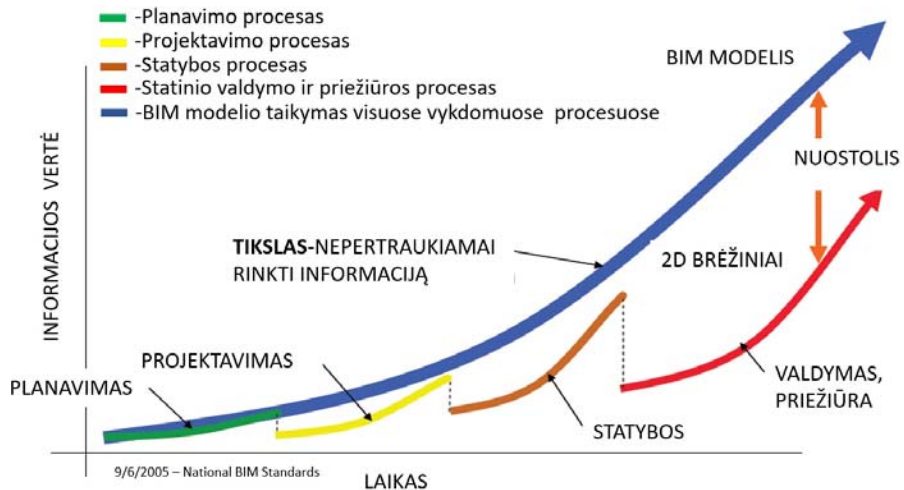
1.3. Statybų informacijos modeliavimas analizuojant energijos vartojimo efektyvumą

Naujausi moksliniai tyrimai sutelkė dėmesį į programinės įrangos ir energijos modeliavimo metodų panaudojimą namų energijos poreikiui apskaičiuoti pagal konkrečias renovacijos priemones, tokias kaip pastato fasado U vertės. Siekiant patobulinti pastatų renovacijos procesų planavimą, siūloma taikyti BIM technologijos principus (Kim *et al.* 2013^a). BIM technologijos naudojimas planuojant visuomeninio pastato modernizacijos projektus palengvintų įvairių renovacijos variantų palyginimą remiantis kiekybiniais kriterijais (Amoruso *et al.* 2018).

Įvertinus tai, jog prieš gerą dešimtmetį buvo pradedama projektuoti nuo paprastų 2D brėžinių, šiuo metu, spartėjant technologijoms, 2D brėžiniai jau yra kuriami iš 3D modelių. Su 3D galima sukurti ypač sudėtingus modelius (architektūrinius ir inžinerinius) (Archistar 2019). Be to, užsakovai/klientai gali naudoti šiuos modelius norėdami suprasti suprojektuotą modelį prieš statybos darbus, įvertinti jų praktiškumą ir ekonomiškumą. Šiuo metu projektavimas gali pereiti nuo koncepcijos sukūrimo žymiai greičiau nei anksčiau. Taikant BIM technologiją (3D modeliai su visa skaitmenine duomenų baze) daugiausiai dėmesio skiriama statinio skaitmeninio modelio kūrimui. Struktūrizuota informacija BIM modelyje leidžia lengviau valdyti procesus. Tai taupo laiką atnaujinant pastato dalis ir mažina klaidų skaičių.

BIM technologija yra taikoma ne tik norint gauti visą informaciją skaitmeniniu pavidalu (skaitmeninis realybės modelis), tačiau ir siekiant užtikrinti informacijos sklaidą visu proceso laikotarpiu. Informacijos vertė laiko atžvilgiu turi labai didelę reikšmę (Building smart 2005). Vykdamas statinio įgyvendinimo procesų eigą: nuo statinio planavimo iki jo valdymo, keitimasis informacija tarp projekto dalyvių daro didelę įtaką komunikacijos, gaminio kokybei, įgyvendinimo laikui, bei energijos sąnaudoms. Nenutrūkstamas informacijos srautas tarp įvairių procesų leidžia lengviau automatizuoti atliekamas veiklas, numatyti galimas išlaidas, lengvina planavimo procesus (1.2 pav.). BIM apibrėžia veiklas, kurios siejamos su skaitmeniniu statinio informaciniu modeliavimu. Tai nėra tik objekto sukūrimas, jis apima visus procesus ir informacijos srauto valdymą. Informacinis modeliavimas apima pastatų virtualųjį vaizdavimą, išmanųjį modeliavimą ir ND modelio sukūrimą. BIM modelį sudaro išmanūs objektai, kuriems priskirti parametrai: geometrija, vieta erdvėje, santykis su kitais objektais ir kitos specifinės savybės (medžiagos, šilumos parametrai ir kt.). Statybos projektuose vis labiau naudojami BIM modeliai, nes siekiama gauti optimalaus gamybos efekto. Egzistuoja koreliacija tarp faktinės statybos trukmės ir faktinės statybos kainos. Ji gali turėti panašius parametrus kaip ir funkcijas, apibūdinančias santykį

tarp sutartinės (kaip planuota) trukmės ir pastato rekonstravimo darbų kainos (Czarnigowska, Sobotka 2013).



1.2 pav. Pastato valdymo procesas įdiegus BIM sistemą (Building smart 2005)

Fig. 1.2. Building management process after BIM implementation (Building smart 2005)

Pasibaigus naujo pastato statyboms, BIM modelio informacija toliau naudojama siekiant efektyviai valdyti pastatą visu jo gyvavimo ciklu. Nors BIM technologija taikoma architektūros, inžinerijos ir statybos sferoms, šis procesas vis dar gana sudėtingas dėl labai fragmentiško statybos pobūdžio: yra sudėtinga integruoti įvairios informacijos valdymą per visą projekto įgyvendinimo ciklą į bendrą sistemą (Okakpu *et al.* 2018). Kadangi BIM didžiausia nauda yra pastato valdymas (Becerik-Gerber *et al.* 2012, Akcamete *et al.* 2010, Arayici 2008), o jo vertinga informacija yra pastatyto statinio dokumentacija, kuri reikalinga garantijos ir valdymo priežiūrai (Singh *et al.* 2011), kokybės kontrolei vykdyti (Boukamp, Akinci 2007, Akinci *et al.* 2006), statinio būklei vertinti ir stebėti pastatų energijai valdyti (Cho *et al.* 2010), ekstremalioms situacijoms valdyti arba modernizavimui planuoti (Mill *et al.* 2013, Arayici 2008) vykdyti. Tokiems procesams suvaldyti būtina kaupti ir struktūrizuoti skaitmeninę informaciją kaip galima anksčiau.

Statinio griovimo procesams taip pat gali būti naudinga struktūrizuota naujausia pastato informacija, kad būtų sumažinta klaidų ir finansinės rizikos, pvz. planuojant griovimo seką, apskaičiuojant sąnaudas, taip pat siekiant sklandžiam griovimo eigos stebėjimui trukmės ir darbų kainos atžvilgiu bei duomenų valdymui.

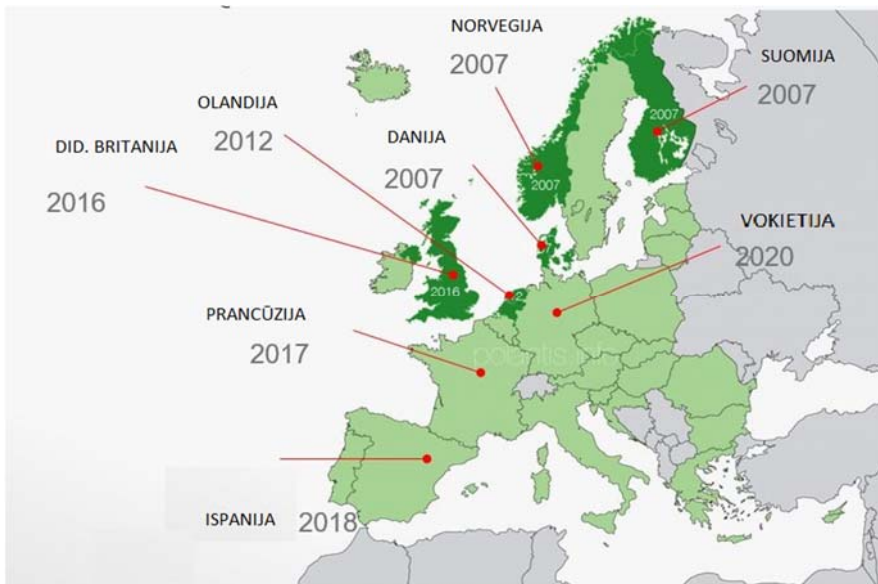
1.4. Statinio informacinio modeliavimo evoliucija ir panaudojimo galimybės

BIM technologija išsivystė iš CAD sistemų pagrindų (XX a.), ir buvo aprašyta mokslininkų (Eastman *et al.* 2008). BIM technologija pirmiausiai apibūdinama kaip trimatis grafinis modelis. Šios technologijos pagrindas buvo informacija apie grafinį modelį (Froese 2003), apimančią pastato geometrinį modelį, jo fizines savybes, atskirų jo sudedamųjų dalių ir funkcinių detalių pavadinimus. Tačiau jau nuo 90-tų metų (1.5 pav.) BIM žodžio reikšmė įgijo naują prasmę, šis trimatis grafinis modelis tapo žinomas kaip SBM (angl. *Single Building Model* – vieno pastato modelis). Tokį apibūdinimą paskatino programinių įrangų pardavėjai: Autodesk Revit, Graphisoft ir Bentley (Jung, Joo 2011). BIM technologija po truputi tapo tam tikru statybos pramonės standartu, kur integruojant platų informacijos spektrą, modeliuojant ir kuriant virtualius, skaitmeninius modelius (Lee, Ha 2013; Leite *et al.* 2011) buvo siekiama suvaldyti informacijos srautus tarp įvairių sričių atstovų. Tad projektavimo įmonės ėmėsi diegti BIM technologiją projektavimo procese (Gu, London 2010).

Spartėjant technologijų raidai, pradėjo atsirasti vis didesni ir globalesni reikalavimai laikytis tam tikrų standartų ir reikalavimų statybos sferoje. Nuo 2017 m. Europos Sąjungą jau reikalauja, kad viešieji projektavimo ir statybos darbai vyktų BIM aplinkoje (1.3 pav.). Visi Europos lyderiai bando modernizuoti statybos pramonę sukurdami tinkamą BIM naudojimo reguliavimo sistemą. Konkrečiau, kaip paskelbta BIM Europos aukščiausiojo lygio susitikime 2016 m. Barselonoje: Didžioji Britanija yra įsipareigojusi vykdyti nacionalinius viešuosius pirkimus nuo 2016; Prancūzija priėmė sprendimą vykdyti viešuosius pirkimus įtraukiant BIM į reikalavimus nuo 2017 m.; Vokietija iki 2020 m.; Šiaurės šalys, įskaitant Norvegiją (2007), Suomiją (2007) ir Daniją (2007) bei Nyderlandus (2012), jau įgyvendino BIM strategijos taikymą viešiesiems pirkimams. BIM technologijos panaudojimas pertvarkys AEC pramonę ir sukurs technologiškai pažangių statybos specialistų visuomenę (Autodesk 2016).

Ekspertų pripažinta, jog BIM ir 4D technologijos leidžia greičiau ir efektyviau bendrauti, teikti informaciją tarp žmonių, kurie yra suinteresuoti projektu. Šių technologijų privalumai matyti iš ankstesnių tyrimų (Aram *et al.* 2013). Straipsnyje (Fan *et al.* 2014) išnagrinėta BIM diegimo įtaka statybos procesui, kuri tik patvirtina naudą bei poreikį statybos ir plėtros projektams.

Įprastas 3D modeliavimas jau seniai suprantamas kaip 4D (Kim, Son 2013) 5D, 6D (Migilinskas, Ustinovichius 2006; Eastman *et al.* 2008; Popov *et al.* 2010). Statinio informacinis modeliavimas (BIM) vaidina pagrindinį vaidmenį automatizuojant statybas ir atitinkamas valdymo sistemas (Linderoth 2010).



1.3 pav. BIM veiklos žemėlapis Europoje (Autodesk 2016)

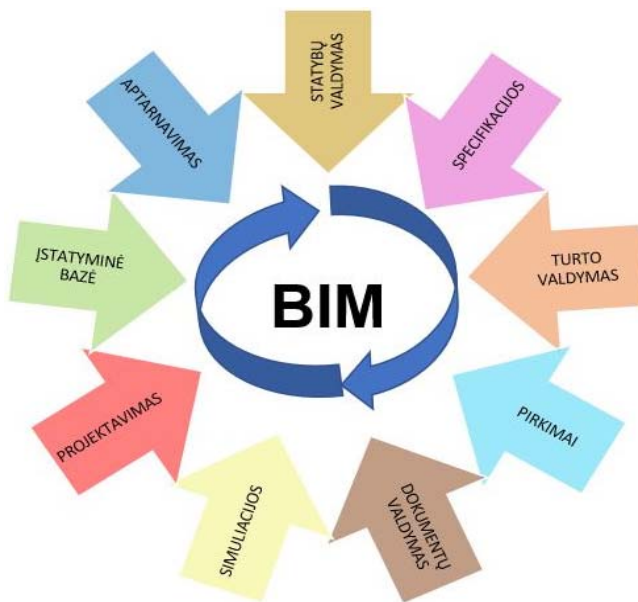
Fig. 1.3. BIM Activity Map for Europe (Autodesk 2016)

Nepaisant BIM poveikio pastato gyvavimo ciklo fazėms, projektuotojai ir rangovai daugiausia dėmesio skyrė BIM panaudojimui projektavimo ir statybos valdymo etapams. Norint pasiekti tvaraus ir energetiškai ekonomišką pastato BIM aplinkoje taikoma ir nD dimensija (Ali *et al.* 2017), kuri apima statinio valdymą, priežiūrą, logistiką, energijos vartojimo efektyvumo valdymą, atlieka gyvavimo ciklo analizę. Toks bendras projekto valdymas apibūdinamas kaip statinio gyvavimo ciklo valdymas (Froese 2003), kuris jau nuo projekto įgyvendinimo pradžios tęsiasi įtraukiant tokius procesus kaip modernizacija, o baigiamas statinio nugriovimu.

Pastato BIM procese cirkuliuojanti informacija (1.4 pav.) (Ustinovičius *et al.* 2015):

- projektavimas – 3D architektūrinis sprendimo modelis turintis atributinės informacijos;
- simuliacijos – energetinės pastato simuliacijos, pastato gyvavimo ciklo prognozės;
- įstatyminė bazė – reglamentai ir specifikacijos, įstatymai;
- priežiūra – gamybos pramonės ir logistikos procesų priežiūra;
- statybų valdymas – statybų grafikų ir logistikos valdymo procesas (4D);

- specifikacijos – klasifikavimo standartas, apskaitos įvertinimas;
- turto valdymas – techninė priežiūra, garantijos, nuoma;
- pirkimai – kainų ir gaminių duomenų bazė;
- dokumentų valdymas – sąmatos, reikalavimai, funkciniai prašymai.



1.4 pav. Pastato valdymo BIM procesas

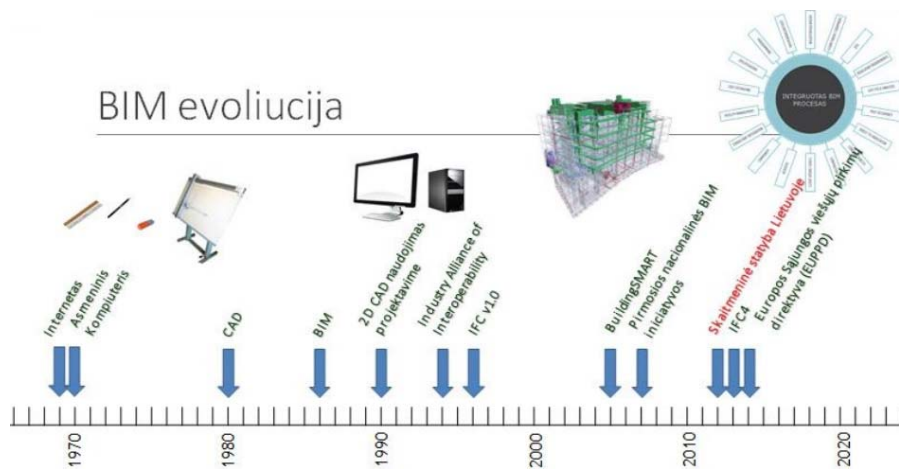
Fig. 1.4. Building management in BIM process

BIM sistemoje ND valdymas apima pastato gyvavimo ciklą nuo pastato sukūrimo iki jo nugriovimo.

BIM valdymo procesas apibūdinamas šiais punktais:

- a) procesų valdymas remiasi kompiuteriniu modeliavimu, kur į statinio projekto parengimą yra įtraukiama projektavimo ir statybos eiga (Miettinen, Paavola 2014);
- b) informacijos valdymas strategiškai pritaikant grafinius duomenis ir statybos darbų planavimo grafikus, integruojant įvairių programinių įrangų sąsajas;
- c) viso statinio greitas, efektyvus ir ekonomiškasis tokių procesų įgyvendinimas (Love *et al.* 2014).

Per pastarąjį dešimtmetį skaitmeninė technologija pakeitė ištisas pramonės šakas, ji dabar žinoma kaip ketvirtoji pramonės revoliucija.



1.5 pav. BIM evoliucija (Skaitmeninė statyba 2014)
Fig. 1.5. Evolution of BIM (Skaitmeninė statyba 2014)

Šios naujos technologijos tenkina ne tik vartotojų poreikį pasirinkti geresnes pramogas, apsipirkimą, transportą ir kt. Inovacijos pagerino įmonių produktyvumą ir tvarumą ir iš naujo apibrėžė įgūdžius ir kompetencijas, kurių reikia klestėjimui.

Viešojo įstaiga „Skaitmeninė statyba“, kuri vykdo skaitmeninio proceso koordinavimo darbus Lietuvoje, pateikė BIM metodo panaudojimo duomenis 2010–2020 m. Lietuvoje. Analizė parodė, jog atliekant projektavimą 3D modeliuojama tik 4 %, likusius procentus sudarė ranka braižomi brėžiniai (2D) ar kombinuotai pasirinkti įvairūs projektavimo būdai (Skaitmeninė statyba 2014). Tačiau per tą patį laikotarpį statybų pramonė ir toliau veikė taip, kaip per pastaruosius 50 metų. Ji vis dar labai priklauso nuo rankų darbo, mechaninių technologijų ir nusistovėjusių veiklos bei verslo modelių. Dėl to našumas šioje sferoje labai mažai kito. Tik neseniai skaitmeninės technologijos pradėjo patekti į pramonę, pamažu keisdamos infrastruktūros, nekilnojamojo turto ir kito pastatyto turto projektavimo, statybų, eksploatavimo ir priežiūros principus. Per dešimtmetį visų procesų (nuo projektavimo iki statybos ir eksploatavimo) skaitmeninimas galėtų padėti pramonei išvengti dešimtmečius trunkančio sąstingio ir per metus padėtų sutaupyti 12–20 % patiriamų išlaidų. Spartus naujų technologijų kūrimas, skaitmeninių duomenų vartojimas taip pat turėtų motyvuoti ir pastūmėti įmones sparčiau taikyti skaitmeninių duomenų valdymą. Klimato kaita, išteklių eikvojimas ir sparti urbanizacija bei didžiulė migracija profesionalių darbuotojų, visa tai skatina įtraukti kuo daugiau automatizuotų ir skaitmeninių procesų (Schwab 2015) į statybos darbus.



1.6 pav. Ateities BIM technologijos integracija (World Economic Forum 2018)

Fig. 1.6. Future BIM technology integrations (World Economic Forum 2018)

1.6 paveiksle vaizduojama ateities automatizuota įvairių procesų ir technologijų sintezė. Vaizduojama visa BIM metodo ideologija – nenutrūkstamas informacijos srautas, keliaujantis nuo vieno proceso iki kito. Taip kaupiama skaitmeninė informacija, kuri naudojama vykdomam procesui ir papildoma kiekvienu etapu:

1. Skaitmeniniu būdu suprojektuoto objekto statinys yra surenkamas gamykloje ar kitoje gamybos vietoje ir paruoštas gaminys gabenamas į statybvietę.
2. Pažangios statinio medžiagos.
3. 3D spausdintuvai naudojami statybos metu.
4. Automatinis ir nuotolinis statybos valdymas.
5. Virtualios realybės ir vizualizacijos naudojimas.
6. Didžiulio duomenų kiekio valdymas ir jų analizė
7. Nuotoliniu būdu atliekamas vykdomų procesų stebėjimas.
8. Informacijos srautų valdymas vieningoje duomenų bazės sistemoje, kur kiekvienas narys, turintis prieigą, gali gauti pačią aktualiausią informaciją.
9. 3D skenavimas ir fotogrametrinio objekto kūrimas, naudojama informacija padeda atliekant auditą ar tikrinant pastatyto objekto atitikimą su suprojektuota informacija.
10. Visa informacija susisteminama ir naudojama viso statinio gyvavimo ciklo eigoje.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Įvertinus literatūros šaltiniuose pateiktą informaciją, kurioje teigiama, kad visuomeniniai pastatai suvartoja beveik 40 % visos suvartojamos energijos Europoje, nustatyta jog senų pastatų modernizacija vis dar vyksta vangiai ir šiems darbams atlikti praktiškai nėra taikomos naujos technologijos, tokios kaip BIM. Iš atliktos literatūros analizės matyti, kad yra didžiulis poreikis modernizuoti senus visuomeninius pastatus, nes jie turi didelę reikšmę suvartojamos energijos dydžiui visoje Europoje.
2. Nustatyta, kad šiuolaikinių technologijų panaudojimas projektuojant pastatus ir juos statant turi trūkumų, nes informacijos dalinimosi procesas vis dar apima tik atskiras statybos veiklas. Didžiausia problema šiuo metu yra ta, kad informacija nesuderinta tarp skirtingų sistemų ir procesų. Dėl šios priežasties vis dar nepavyksta pasiekti, kad pastato modernizacijos darbai būtų atliekami kiek įmanoma labiau automatizuotu būdu: nuo realybės fiksavimo iki pastato audito ir statinio trūkumų įvertinimo.
3. Įvertinus literatūros šaltiniuose minimo statinio informacinio modeliavimo (BIM) taikymą atliekant pastato priežiūrą, galima teigti, jog ši technologija yra sparčiai taikoma naujų statinių projektavimo ir statybos sferose, kadangi ji užtikrina greitą ir tikslų darbų atlikimą, o nenutrūkstamos informacijos valdymas lengvina planavimo procesus bei leidžia lengviau automatizuoti procesus.
4. Įvertintos BIM technologijos taikymo sritys. Šios technologijos didžiausia nauda – skaitmeninė informacija, kuri yra vienodai suprantama visuose procesuose priimant sprendimus.
5. Įvertinus naujų technologijų raidos spartą, nustatyta, kad statybos veikloje dar nėra įgyventinta daug automatizuotų procesų, o ir naujos technologijos skirtingose srityse dar nėra vieningoje valdymo sistemoje.

Atsižvelgiant į apibendrinamus rezultatus, matomas poreikis sukurti metodą visuomeninių pastatų modernizacijai įgyvendinti taikant šiuolaikines technologijas ir optimizavimo modelio algoritmą atsižvelgiant į siekiamą energijos klasę atlikus modernizaciją.

Suformuluoti disertacijos uždaviniai:

1. Suformuoti senų visuomeninių pastatų modernizacijos optimizavimo algoritmą, kad jo pagrindu būtų įgyvendinta pastato vartojamos energijos efektyvumas, taikant BIM technologijos pagrindus.

2. Parengti modernizacijos optimizavimo algoritmą, pastato energijos efektyvumo uždavinio sprendimui.
3. Sukurti skaitmeninį trimatį pastato modelį pastatų modernizacijos pritaikymui.
4. Taikant modernizacijos optimizavimo algoritmą, atlikti modernizuojamo pastato duomenų analizę ir nustatyti sprendimų efektyvumo naudą taikant BIM technologijos pagrindus.

Visuomeninių pastatų modernizacijos modelis taikant energijos efektyvaus vartojimo principus ir statinio informacinio modeliavimo technologiją

Šiame skyriuje aptartos visuomeninių pastatų modernizacijos galimybės ir energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonės. Nustatytos labiausiai energijos nuostolius lemiančios pastato konstrukcijos dalys. Pateikta, kaip šiuolaikinėmis technologijomis galima lengviau įvertinti esamą statinį ir nustatyti jo būklę. Skyriuje aptarta, kaip pritaikyti fotogrammetrinę realybės fiksavimą skaitmeniniam projektavimui. Pristatomos BIM modelio galimybės atliekant analizes ir duomenų bazės panaudojimo ir pritaikymo galimybės klasifikuojant ir koduojant į statinio struktūras. Pateiktas optimizavimo modelis, kuris apima pastato elementų energetinių simuliacijų formavimą, daugiakriterį modelio taikymą atrinktų variantų variacijoms nustatyti bei sukurtos modernizacijos priemonių atrankos sprendimų modelio medį efektyviausiam modernizacijos variantui rasti.

Sukurtas optimizuotas modernizacijos algoritmas uždaviniui spręsti panaudoti variacijų analizės ir daugiakriteris skaičiavimo metodai.

Skyriuje nagrinėjama tema autorė kartu su bendraautoriais paskelbė keturias publikacijas (Ustinovičius *et al* 2017; Ustinovičius *et al* 2018; Kontrimovičius *et al* 2018).

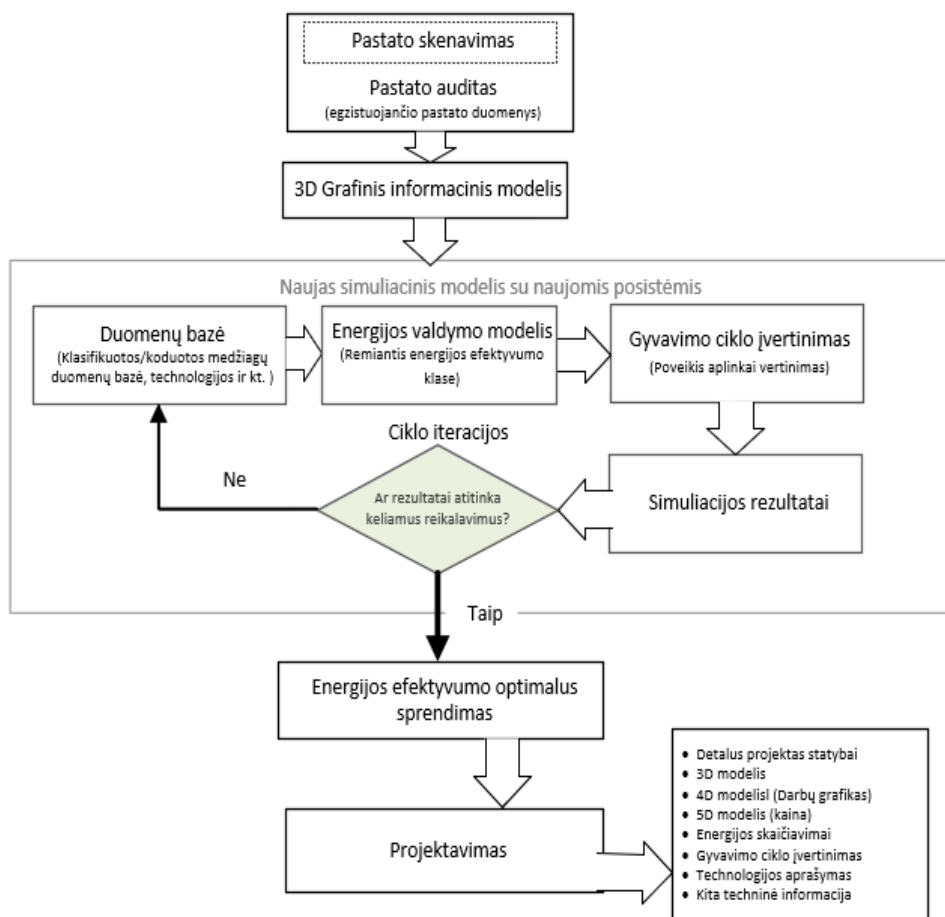
2.1. Visuomeninių pastatų modernizacijos modelio pagrindinių etapų aprašymas

Visuomeniniai pastatai paprastai tenkina visuomenės poreikius atsižvelgiant į nuostatas STR 1.01.03:2017. Jie apima viešbučius, administracinius pastatus, prekybos pastatus, paslaugas teikiančius pastatus, maitinimo įstaigas, transporto pastatus, kultūrinius pastatus, švietimo įstaigas bei religinius pastatus (STR 1.01.03:2017). Daugumos visuomeninių įstaigų klimato būklė neatitinka šilumos komforto parametrų, todėl šie pastatai turi būti modernizuojami pagal Lietuvos higienos standartus (HN 42: 2009). Efektyvios energijos poreikis gali būti pasiekiamas tam tikromis sąlygomis renkantis pastato modernizaciją. Technologijų progresas, inovatyvi konstrukcijų technika leidžia naujus sprendimus panaudoti kiekvienam pastato ir medžiagos elementui (Lombera, Rojo 2010).

Atliekant visuomeninio pastato modernizacijos užduotį turi būti įvertinti visi procesai nuo esamo pastato energijos klasės nustatymo iki šiuolaikinių technologijų pritaikymo bei atrinktų modernizacijos variantų analizės (2.1 pav.).

Atliekant pastatų analizę kur yra reikalingi preciziškai tikslūs techniniai parametrai, taikomi skaitmeniniai modeliai (Li, Yang 2014). Pastato skaitmeniniam modeliui sukurti, projektuotojui reikia nemažai laiko sąnaudų, kol surenkama pastato dokumentacija, išmatuojama jo reali geometrija. Norint palengvinti šį procesą siūloma naudotis lazerinio skenavimo technologija. Ši technologija tiksliai ir greitai sukuria skaitmeninį realaus pastato modelį, kurį vėliau galima pritaikyti tiek projektavimo, tiek statybos darbams. Tobulėjant šiuolaikinėms technologijoms, kai net nėra būtina turėti itin brangių prietaisų, kad galima būtų sukurti gan tikslų realybės skaitmeninį modelį, užtenka panaudoti skaitmeninį fotoaparata. Toks realybės fiksavimas yra vadinamas fotogrammetrinio fiksavimu. Fotogrammetrija dažnai taikoma siekiant sukurti realistiškus objektų mastelius naudojant daugybę iš dalies sutampančių ar persidengiančių nuotraukų (Altaweel 2016). 3D realybės fiksavimas sukuria išsamų 3D realybės objektą.

Fiksuotos pastato konstrukcijos įvertinamos ekspertų ir nustatomos didžiausią įtaką darančių konstrukcijų pažaidos. Tik įvertinus konstrukcijų fizinę būklę ir realią pastato energetinę klasę, duomenis galima į skaitmeninį modelį.



2.1 pav. Pastato modernizacijos modelis
Fig. 2.1. Model of building modernization

Virtualus realybės atvaizdavimas skaitmeniniu formatu sukuriant objekto modelį padeda tiek projektuotojui, tiek kitiems su statinio modernizacija susijusiems specialistams dalintis bendra informacija. Statinio skaitmeninis modelis palengvina jo manipuliavimą taikant įvairias konstrukcijas iš duomenų bazės. Tokio modelio sukūrimas ir klasifikuotos atributinės informacijos pritaikymas sukuria pagrindą BIM technologijos panaudojimo principams. Klasifikuota skaitmeninė informacija galima ne tik lengvai pritaikyti informacijos kaitą modelyje, tačiau ir bet kuriuo metu gauti patikimą ir aiškią medžiagų kiekio ataskaitą, kuri lengvai siejama su tam tikrų sistemų kainų duomenų baze.

Saugoma duomenų bazė modelyje gali būti ne tik geometrinių, bet ir šiluminių parametrų bei esamų energijos sistemų informacija.

Taikant BIM modelį yra paprasčiau atlikti automatizuotą energijos simuliaciją. Šios simuliacijos ir modeliavimo tikslas: nustatyti pagrindines pastato atitvarinių konstrukcijų ir inžinerinių sistemų (vėdinimo, elektros, šildymo sistemų ir kt.) parametrus. Įvesties duomenys tokie: nuskenuotos pastato konstrukcijos, sukurtas pastato BIM modelio suklasifikuota informacija. Papildoma informacija – pastato energijos klasė po modernizacijos atlikimo. Remiantis reikalaujama ES šalių strategija kad iki 2020 m. CO₂ emisiją turi sumažėti 20 %, palyginti su 1990 m., ir tik 20 % turi būti pagaminta iš atsinaujinančių energijos šaltinių, itin svarbu simuliacijų ir modeliavimo vertinimui įtraukti gyvavimo ciklo parametrus. Tad modeliavimo paskirtis yra CO₂ emisijos mažinimo ir įvairių energijos prietaisų šilumos tiekimo analizė. Atliekant šias simuliacijas, pagrindinis tikslas yra sumažinti išmetamo CO₂ kiekį taip optimizuojant šildymo išlaidas.

Siekiant parinkti optimalius parametrus ir numatyti alternatyvius šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo šaltinius, būtina įvertinti automatizuotas energijos modeliavimo pritaikymo galimybes projektavimo procesui. Kadangi šis procesas nėra automatizuotas, tad parenkami optimizuoti variantai reikiamam tikslui pasiekti. Naudojamas daugiakriteris sprendimas (taikomas daugiakriteris sprendimų sintezės metodas SyMAD–3), kuris lemia racionalaus modernizuojamo pastato varianto pasirinkimą. Integruoti TOPSIS, SAW, COPRAS sprendimo priėmimo metodai pastato išorinės dalies konstrukcijų nustatymui, statybai pasirinktų rodiklių reikšmingumo nustatymo metodai, pastatų inžinerinė įranga. Atliekant alternatyvų analizę pagrindiniai tikslai gauti išsamius rezultatus ir jų kuo paprastesnę pritaikymą įgyvendinant pastato (Dziadosz, Konczak 2016) modernizaciją. Šiuo metu nėra metodikos, kuria būtų galima lyginti skirtingas alternatyvas pagal jų efektyvumą ir kokybę (Kreiner *et al.* 2015).

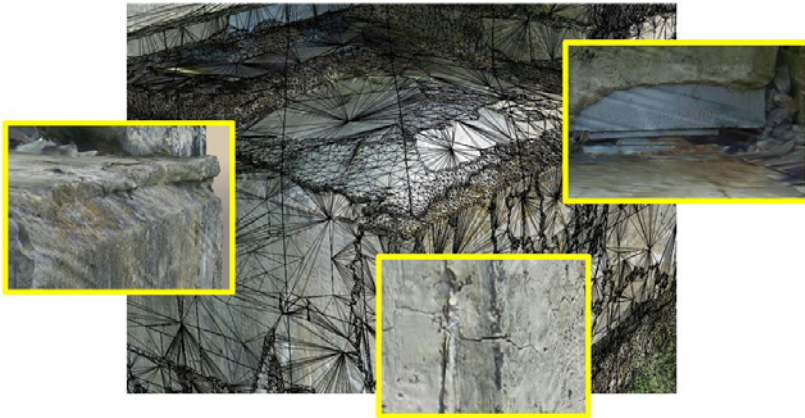
Analizuojant pastatų energijos vartojimo efektyvumo nustatymą, taikomos specialios projektavimo programos, kurios naudojamos energetinių pastatų projektavimui. Toks projektavimo būdas suteikia galimybę optimizuoti šildymo ir vėdinimo apkrovas naudojant šilumos balansą, nustatant mėnesinę ir valandinę pusiausvyrą. Darni projektavimo informacijos srautų dalinimosi sistema leidžia procese dalyvauti visiems su projektu susijusiems dalyviams (nuo užsakovo iki statytojo). Taip pat BIM technologijos taikymas nuo projektavimo stadijos užtikrina patikimos informacijos panaudojimą ne tik statybose, tačiau ir vėliau valdant pastatą. Taip užtikrinamas laiku atliekamas remontas, kad kuo ilgiau būtų palaikoma pastato energijos klasė, taip sumažinant energijos sąnaudas.

2.2. Trimačiai skaitmeniniai fotogrammetriniai modeliai

Fotogrammetrija yra objekto matavimo technologija, kuria galima matuoti realų objektą iš nuotraukų ir kuri pasitelkus programinę įrangą iš nuotraukų sukuria erdvinį trimatį objektą (realiose koordinatinių sistemose). Kaip nurodoma literatūroje, fotogrammetrija yra metodas naudojamas užfiksuoti esamą objekto būseną (Golparvar-Fard *et al.* 2011, Kim *et al.* 2013^b, Klein *et al.* 2012). Vienas iš fotogrammetrijos ypatumų tai, kad matavimai dažniausiai atliekami be jokio kontakto su matuojamu objektu. Fotogrammetrijos pranašumas yra tas, kad įprastos nuotraukos gali būti panaudotos atkuriant 3D vaizdus. Dėl to fotogrammetrija tapo ekonomiškai būdas 3D objektams kurti be lazerinių skaitytuvų ar kitos brangios įrangos (Ordonez *et al.* 2010). Įrodyta, kad architektūros požiūriu tai yra ekonomiškai būdas sukurti pakankamai tikroviškus daugialypius pastatų modelius (Rau, Cheng 2013). Dėl vis gerėjančios tikslaus fiksavimo kokybės ir paprasto bei pigaus vartojimo, fotogrammetrija tampa vis populiareesnė vartotojams, neturintiems specialių žinių šiai technologijai įvaldyti ir kuriantiems realybės modelius iš nuotraukų. Dėl išmaniųjų telefonų ir dronų prietaisų buvo pakeistos įprastos veidrodinės kameros ir senesnė fotogrametrinė įranga (Jeong *et al.* 2016). Fotogrammetrijos modelis yra kuriamas nuotraukų pagrindu, kurios vėliau pasitelkus programinę įrangą paverčiamas erdvinio 3D modeliu. Šis sukurtas modelis atitinka realius matmenis ir suteikia galimybę atlikti analizę nuotoliniu būdu. Tokie fotogrammetriniai modeliai gali būti pritaikomi atliekant inspektavimo darbus, nustatant konstrukcijų įtrūkius ar kitas pažeidas, tokias kaip koroziją (2.2 pav.). Fotogrammetrijos fiksavimo technika sujungia ir sumodeliuoja į 3D objektus iš bent dviejų 2D dimensijų persidengiančių nuotraukų (Dai, Lu 2010). Šio 3D modelio pritaikymo procesas sudarytas iš nuotraukų orientavimo, dviejų arba daugiau nuotraukų persidengiančios informacijos taškų, bei 3D modelio sukūrimo naudojant matematinę sankirtą (Ordonez *et al.* 2010).

Tradiciniai matavimo įrankiai statinių fiksavimui yra lazerinis skenavimas, skaitmeninės kameros objekto fiksavimas nuotraukomis bei įprasti matavimo būdai (Jung *et al.* 2014). Šiais būdais viso pastato sudėtinių dalių dimensijos yra rankiniu būdu matuojamos ir fiksuojamos, pavyzdžiui, sienos langai ir durys. Toks tyrimas reikalauja daug laiko ir dažniausiai dėl žmogiškojo faktoriaus turi klaidų (Anil *et al.* 2011). Be to, duomenys dažnai interpretuojami rankiniu būdu, todėl jie nėra integruojami elektroninėje objekto erdvėje ir plane. Realybės modeliavimas yra fizinės realybės fiksavimas sukuriant jo erdvinę reprezentaciją (realus skaitmeninis objekto dvynys). Šiame darbe nagrinėjama viena „Bentley“ kompanijos sukurta programinė įranga (Bentley 2018), kuri taiko fotogrammetrinio modelio kūrimo technologiją (ContextCapture). Ši programa suteikia tikroviško skaitmeninio objekto vaizdo, realių parametrų 3D formatą.

Ši realybės fiksavimą galima naudoti įvairiose srityse, pavyzdžiui, eksploatacijos arba net GIS (angl. *Geographic information system*) platformoje.



2.2 pav. Inspektavimas, korozija, pleišėtumas (Urbšys 2016)

Fig. 2.2. Inspection, corrosion, cracking (Urbšys 2016)

Iš persidengiančių dronų nuotraukų ir nuo žemės paviršiaus fiksuotų nuotraukų, sugeneruotų programinės įrangos „ContextCapture“, galima sudaryti realiuosius objektus bet kokio norimo tikslumo lygio ir mastelio.

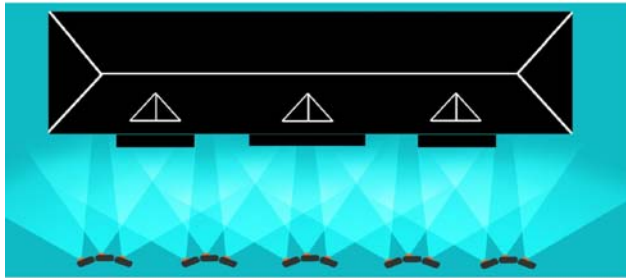
Norint sukurti erdvinį modelį naudojantis „ContextCapture“ programine įranga, būtina žinoti jos naudojimo principus. Svarbu atkreipti dėmesį, kad fiksuojant objektą nuotraukomis reikia, jos fiksuojamojo objekto nuotraukos tarpusavyje turėtų persidengiančios informacijos. Lengvas būdas tai pasiekti būtų fotografuoti objektą mažais žingsneliais (turint bent 60 % sutampančios vaizdinės informacijos ir maksimalų 15° kampą tarp vienos paskui kitą einančių nuotraukų). Rekomenduojama, kad daromų nuotraukų rezoliucija būtų vienoda. Norint tai pasiekti, reikia stengtis laikyti kamerą tokiu pat atstumu nuo objekto per visą fotografavimo procesą (2.3 pav.).

Jeigu norima, kad būtų daugiau detalių 3D modelyje, reikia fotografuoti vis artėjant prie objekto. Svarbu išlaikyti panašią rezoliuciją nuotraukose, nes turint labai įvairią rezoliuciją aerotrianguliacijos metu galima patirti nesėkmę ir vaizdas 3D modelyje bus iškraipytas. Rekomenduotina turėti vidutinio diapazono nuotraukas, kad galima būtų susieti tas nuotraukas, kurios buvo daromos iš arti ir tas, kurios buvo daromos iš tolumo atstumo. Reikia vadovautis tam tikromis taisyklėmis, kad būtų gautas geras rezultatas:

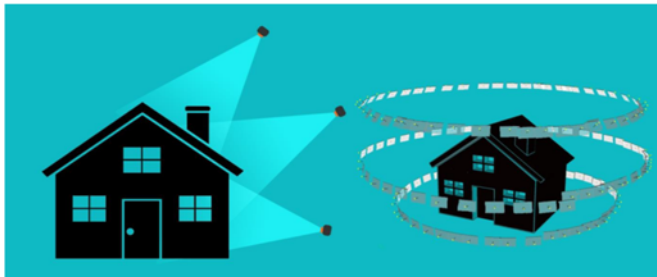
- reikia sekti specifinę fotografavimo tvarką norint išvengti trūkstančių dalių;

- fotografuoti bent 3 kartus tą pačią dalį iš įvairių kampų;
- suvaržyti fotografavimo kampą tarp dviejų viena paskui kitą einančių nuotraukų iki 15° kampo;
- paprasčiausias būdas užfiksuoti fasadą yra fotografuoti iš įvairių tolygiai pasiskirsčiusių stočių skirtingais kampais.

Jeigu neįmanoma nufotografuoti pastato viso aukščio dėl atstumo trūkumo, nes pastatas yra per aukštas, tokiu atveju reikia fiksuoti objekto nuotraukas taikant kitokį metodą, keliant droną kelis kartus į viršų. Naudojant droną rekomenduotina apibrėžti apskritimą erdvėje aplink pastatą įvairiais lygmenimis, kad sumažėtų paslėptos pastato zonos (2.4 pav.). Pabaigti pildyti duomenis, gautus tiek fotografuojant iš aukštai, tiek fotografuotomis nuo žemės paviršiaus.



2.3 pav. Pastato fotografavimo būdas (Bentley 2018)
Fig. 2.3. Building photogrametry model (Bentley 2018)



2.4 pav. Drono skraidymo schema (Bentley 2018)
Fig. 2.4. Dron flight diagram (Bentley 2018)

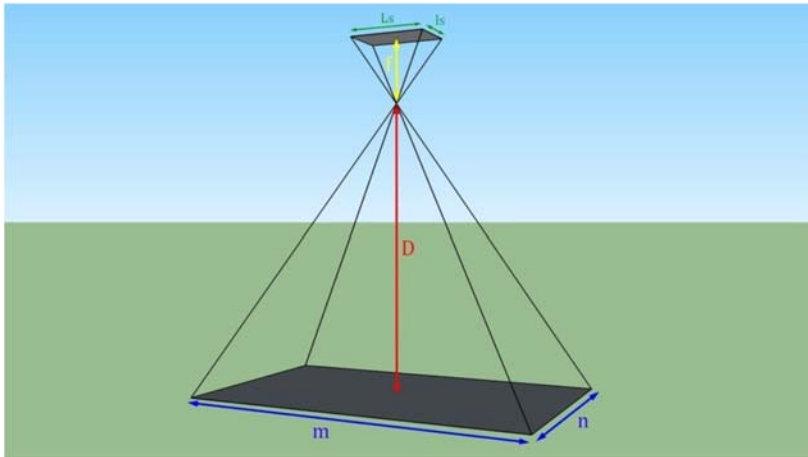
Profesionalūs dronai paprastai turi įdiegtą skrydžio planavimo programinę įrangą, kuri įvertina automatiškai geriausio skrydžio planą atitinkamai kamerai, lėšiuui ir norimam atstumui nuo žemės tikslumui gauti (2.5 pav.). Tokiu būdu atlikti matavimai pasižymi gana aukštu matavimo tikslumu, kuris gali būti sulyginamas

su gaunamais topografinio plano duomenimis. Pateikiama formulė (Bentley 2018), iš kurios galima apskaičiuoti tikėtiną tikslumą „ContextCapture“ programa.

$$R = \frac{L_s \cdot D}{f \cdot L}; \quad (2.1)$$

$$P = 3 \cdot R, \quad (2.2)$$

čia: L_s – didžiausias sensoriaus ilgis, mm; D – atstumas tarp kameros ir objekto, m; f – kameros židinio nuotolis, mm; L – didžiausias nuotraukos dydis, Px; R – erdvinė žemės rezoliucija nuotraukose fiksuojama pikseliais, m/Px; P – erdvinės padėties nustatymo tikslumas 3D tinkle (2.5 pav.).



2.5 pav. Foto projekcija ant žemės (Bentley 2018)

Fig. 2.5. Photo projection on the ground (Bentley 2018)

Fotografuojant šie parametrų dydžiai: L_s , f ir L yra dažniausiai fiksuojami skirtingomis kameromis, tad vienintelis būdas kaip pagerinti nuotraukų tikslumą yra sumažinti skrydžio aukštį. Tai reikštų, kad reikėtų daugiau nufotografuoti, kad galima būtų gauti kuo didesnę objekto tikslumą. Tiksliausias trimatis modelis būna, kai yra nurodyta tiksli fotografuojamo objekto padėtis koordinačių sistemoje. „ContextCapture“ programoje modelis gali būti geografiškai nurodytas naudojant importuotas koordinates, gaunamas iš skaitmeninių aparatų, arba pridėdant kontrolinius taškus (kuriuos vėliau koordinuoja geodezininkas). Toks tikslumas tada priklausys nuo skaitmeninių, persidengiančių nuotraukų ir

kontrolinių taškų tikslumo. Fotogrammetriniai modeliai jau kuriami šiuo metu ir yra populiarūs kai reikia prižiūrėti ir stebėti statybas, kai net galima palyginti projektuotą medžiagą ir realią situaciją viename plane. Pavyzdys iš realaus objekto Estijoje, kai fotogrammetrinė medžiaga naudojama planuojant statybas. Šiame plane buvo lyginama 3D erdvinė informacija su projektuojama medžiaga (2.6 pav.) (Sputnik 2019). Iš palyginimo su projektuojama medžiaga ir užfiksuota realybe matyti, kiek atlikta darbų ir kokie jau šiuo metu išryškėja nuostoliai: iškasta per daug žemės arba nenukastas reikiamas kiekis, 2.6 paveiksle pavaizduotas Estijos Rakvere pilies fotogrammetrinis 3D modelio projektas (Sputnik 2019). Visus pokyčius galima matuoti realiais matavimo vienetais.



2.6 pav. Fotogrammetrinio modelio pavyzdys (Sputnik 2019)

Fig. 2.6. Example of a photogrammetric model (Sputnik 2019)

Pasitelkiant šias realybės fiksavimo technologijas, buvo sukurtas tiriamojo objekto 3D fotogrammetrinis modelis (2.7 pav.). Radviliškio manevrinio dispečerinio posto (Bokšto g. 13) pastatui modernizuoti atlikti fotografuoti tiek antžeminiu fotografavimo būdu, tiek dronu. Buvo padaryta 1000 nuotraukų, kurios programine įranga buvo sujungtos automatinio būdu. Modeliui sukurti teko įvesti pastato kampų koordinates Lietuvos koordinacių sistemoje (LKS94), kad būtų gautas kuo didesnis trimačio erdvinio modelio tikslumas. Buvo pasiektas tikslumas iki 5 cm, palyginti su topografinės nuotraukos medžiaga.



2.7 pav. Radviliškyje Bokšto g. 13, esančio pastato 3D fotogrammetrinis modelis
Fig. 2.7. Boksto str.13, Radviliskis 3D photogrammetric model of a building

Sukurtas modelis naudingas pasiruošiamiesiems projektiniams darbams atlikti: apskaičiuoti fasado plotą, langų bei stogo plotus, įvertinti jautriausias ir labiausiai pažeistas pastato fasado dalis. Taip pat šis trimatis skaitmeninis modelis vėliau taikomas atliekant modeliavimo darbus. Tokio modelio nauda yra ir tai, jog norimus pastato geometrinius duomenis galima patikrinti nuotoliniu būdu, nebūtina kaskart vykti į objekto vietą, tam kad patikslinti vienus ar kitus duomenis. Didelė nauda taip pat yra, jog galima tiksliai nustatyti šildymo sistemų išsidėstymą ant pastato fasado, įvertinti ant stogo esančių sistemų ir įrenginių išsidėstymą. Projektuotojui turint tokio tipo trimatį modelį, kuris atitinka pastato matmenis, yra lengviau ir greičiau pritaikyti modeliavimo principus, kadangi toks modelis padeda kontroliuoti galimų klaidų ir netikslumų kiekį.

2.3. Pastatų inventorizavimas ir tyrimai

Pagrindinės pastato būklės įvertinimas susideda iš šių sistemų:

- įvertinamos pastato atitvarinės konstrukcijos;
- vidinių pastato erdvių, patalpų įvertinimas (norminių komforto sąlygų užtikrinimas);
- pastato inžinerinių sistemų nustatymas (energijos sąnaudos).

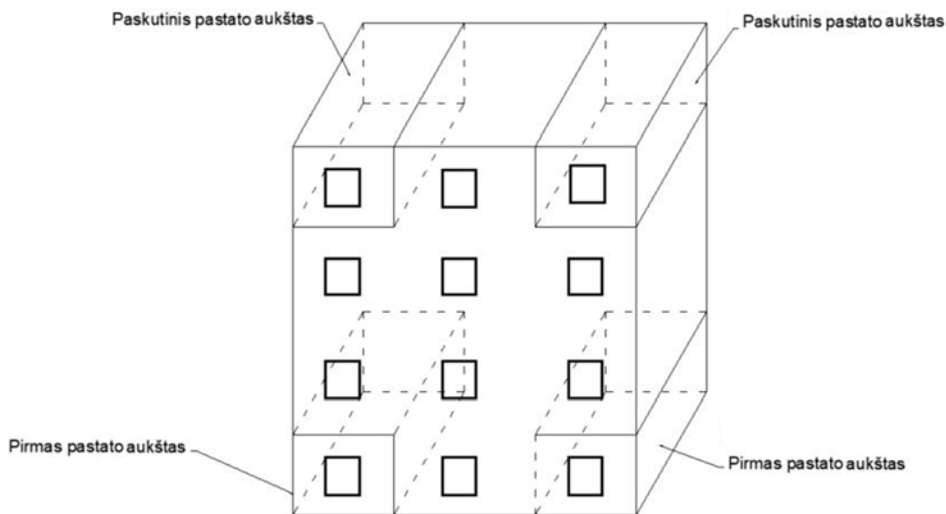
Architektūrinis sprendimas bei optimalus pastato atitvarinių sistemų parinkimas turi didelę įtaką būsimoms pastato energijos sąnaudoms. Pastato eksploataavimo trukmę galima pailginti parinkus tinkamus atitvarinių sistemų sprendimus taip sumažinant pastato energijos suvartojimą. Tačiau pastato gyvavimo trukmę taip pat lemia architektūriniai sprendimai, kurie daro poveikį pastato energijos nuostoliams mažinti.

Komforto sąlygos patalpoje yra apibrėžiamos palankiomis temperatūros ribinėmis reikšmėmis, atitvarinių konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientais, ribine CO₂ koncentracija patalpų ore ir patalpose santykinio oro drėgnumu patalpose. Patalpų šilumos parametrai priklauso nuo pastato atitvarinių konstrukcijų būklės ir vidaus aplinkos parametrų. Patalpų naudojimo intensyvumas, šildymo sezonas ir taršos šaltiniai taip pat turi įtakos oro patalpų kokybei, o tai neatsiejama vertinant šilumos parametrus. Mikroklimate sąlygų užtikrinimas yra labai svarbus atliekant modernizacijos darbus (Friege, Chappin 2014; Hernandez *et al.* 2015; Dzeng *et al.* 2015; Mjoernell *et al.* 2014).

Inžinerinės sistemos yra trečiasis pastato sistemos elementas. Šių sistemų pagrindinė funkcija – užtikrinti tinkamas komforto sąlygas patalpose.

Norint nustatyti atitvarinių konstrukcijų būklę, reikia apibūdinti šiuos parametrus: atitvarinių konstrukcijų fizinę būklę, nusidėvėjimas, šilumos laidumas, paviršiaus temperatūros, patalpų ir lauko oro temperatūrų skirtumai.

Vidinių erdvių temperatūros režimai ir šilumos perdavimo koeficientai matuojami svarbiausiuose tiriamojo pastato atitvarinių konstrukcijų taškuose (2.8 pav.).



2.8 pav. Tiriamojo pastato matavimo schema

Fig. 2.8. Schematic diagram of the test building

Norint nustatyti pastato atitvarinių konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientus, tiriamos šios pastato dalys:

- pirmo aukšto kraštinės pastato dalys;

- paskutinio aukšto perdangos;
- pirmo aukšto grindys (rūsio perdanga).

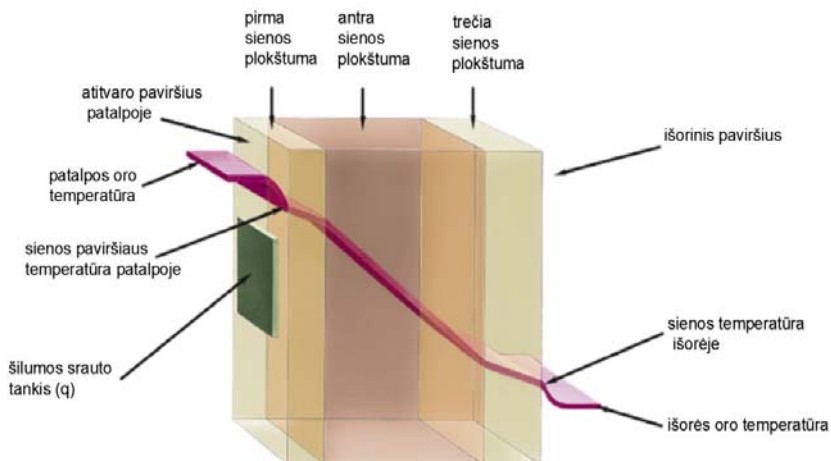
Matavimų rezultatų kokybei garantuoti būtina:

- visi prietaisai turi būti įjungti viename svarbiausiame taške, vienu metu;
- duomenys renkami ir kaupiami ne trumpiau kaip vieną parą;
- parenkamas vienodas duomenų rinkimo tarpsnis visoms tiriamoms vietoms;
- lauko sąlygos turi būti stabilios: neturi būti saulės spindulių ir vėjo poveikio (vėjo mažiausias greitis);
- patalpų mikroklimato parametrai, patalpų lauko oro temperatūros bei atitvarinių konstrukcijų šilumos laidumas.

Pasirenkama klasikinė metodika šilumos perdavimo koeficientams nustatyti (2.9 pav.). Koeficientas U (medžiagos šilumos laidumo koeficientas) nustatomas matuojant patalpos oro temperatūrą θ_i , šilumos srautus q ir išorės oro temperatūrą θ_e ir apskaičiuojama pagal formulę (ISO 6946:2017):

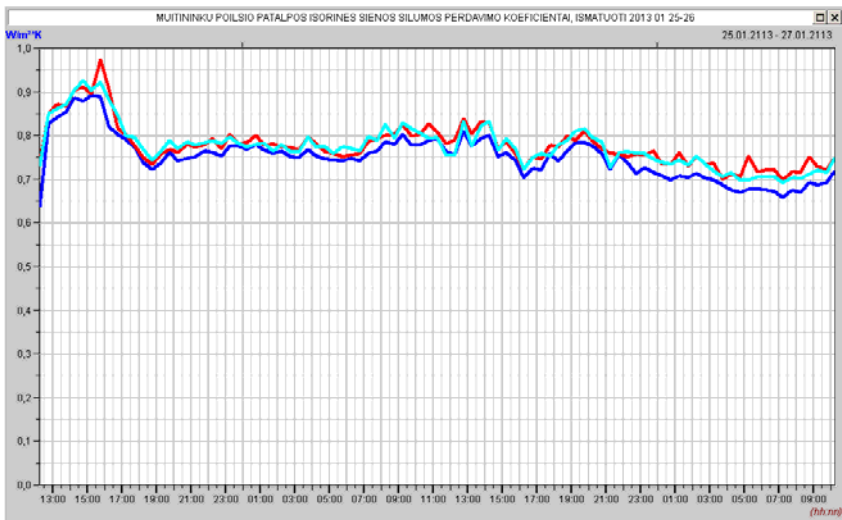
$$U = \frac{q}{(\theta_i - \theta_e)}, \quad (2.3)$$

čia: θ_i – patalpos išmatuotos oro temperatūros vidurkis, °C; q – išmatuotų šilumos srautų per išorines atitvarines konstrukcijas vidurkis, W/m²K; θ_e – išorinės sienos išmatuotos oro temperatūros vidurkis, °C.



2.9 pav. Šilumos srautų per išorines atitvarines konstrukcijas ir temperatūrų matavimo principinė schema (Ahlborn 2016)

Fig. 2.9. Principal scheme of measurement of heat and temperatures flows through external partition constructions (Ahlborn 2016)



2.10 pav. Išorinės sienos matavimų rezultatų pavyzdys (Rasiulis 2017)
Fig. 2.10. Example of Results of Exterior Wall Measurements (Rasiulis 2017)

Įvertinant pastato konstrukcijų parametrus būtina atlikti šiuos matavimus: nustatyti pastato atitvarinių konstrukcijų paviršiaus temperatūras tam kad apskaičiuoti atitvarinių konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientus; įvertinti pertvarų šiluminius laidumus ir atlikti kitus mikroklimato parametrų matavimus naudojant tam skirtus prietaisus. Atliekant tokius matavimus matavimo prietaisais turi turėti tam tikrus parametrus, tokius kaip: termo plokštelė, duomenų valdiklį su duomenų atmintimi, turi turėti temperatūros ir santykinės drėgmės matavimo daviklį taip pat ir CO₂ dujų matavimo daviklį.

Tam, kad gauti kuo tikslesnius duomenis, turi būti atlikti matavimai daugiau nei keletą kartų toje pačioje pastato išorinės atitvarinės konstrukcijos dalies vietoje. Nustatant pastato atitvarinių konstrukcijų šilumos srautus ir temperatūros pokyčius yra rekomenduojama atlikti tokius matavimus nepertraukiamai visą parą (Rasiulis 2017). Iš prietaiso nustatyti matavimo duomenys perkeliama į kompiuterį, kur programinės įrangos pagalba galima sudaryti gautų duomenų grafikus bei apskaičiuoti šilumos perdavimo koeficientų reikšmes (2.10 pav.).

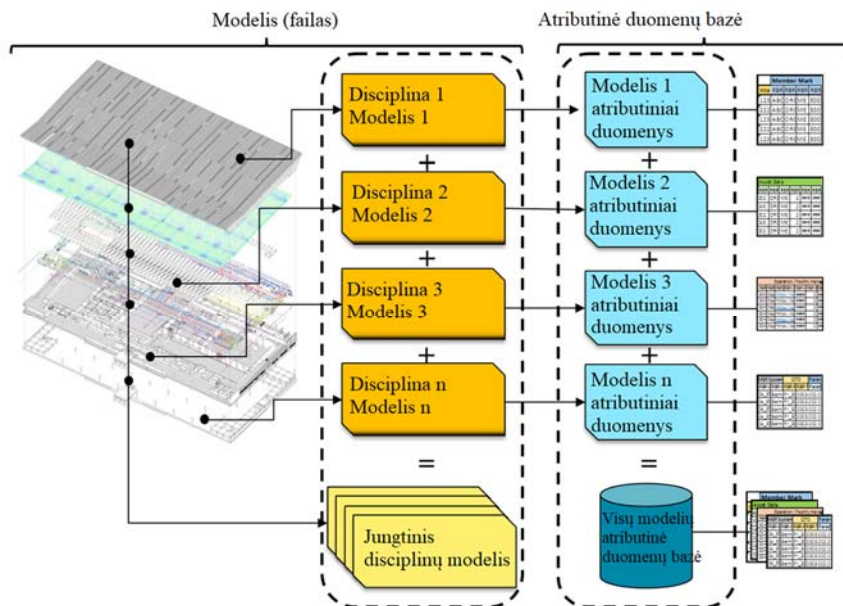
Gavus matavimo duomenis prietaiso pagalba, galima nustatyti ar pastatas atitinka keliamus energinius reikalavimus. Šie duomenis padeda įvertinti pastato būklę prieš modernizacijos darbų atlikimą.

2.4. ND parametrinio modelio ir duomenų bazės kūrimas (klasifikatoriai)

Keitimasis informacija tarp projekto dalyvių turi tam tikrą įtaką bendravimo kokybei, produkto kokybei bei įgyvendinimo trukmei. BIM apibūdina šią veiklą kaip statybos informacijos modeliavimą, o ne kaip 3D objektą. Statybos informacijos modeliavimo sistemos buvo sukurtos tam, kad padėtų kaupti įvairių pastatų struktūrų duomenis (Motawa 2017). Informacijos modeliavimas įtraukia pastatų virtualios realybės kūrimą, pažangią simuliaciją bei ND modelį. Konkrečiai priskirti parametrai apibrėžia geometriją, išsidėstymą erdvėje, sąsajas su kitais objektais ir kitus specifinius duomenis (medžiagos, šilumos našumas ir t. t.). Naujų statinių projektų statybai naudojama BIM technologija, kad galima būtų optimizuoti gamybos efektą ir susieti informacijos srautus tarp realios konstrukcijos laiko ir jos kainos bei pagerinti būsimų statybos darbų planavimo procesą (Czarnigowska, Sobotka 2013).

Atributai aprašo objektų kiekybines ir kokybines savybes ir paverčia 3D modelius BIM modeliais. Informacija ir yra tai kas padaro 2D, 3D ir BIM skirtingus. 3D geometrinis modelis pakeistas į 3D informacinį modelį su duomenų bazės informacija įtraukiant ir koordinuotą procesų fiksavimą paverčia BIM modeliu. Norint pasiekti aiškos ir struktūrizuotos informacijos valdymą BIM modelyje, reikia taikyti standartus, kurie apibūdina objekto kodavimo principus ir apibrėžia klasifikavimo reikalavimus. Atributinė informacija, priskirta tam tikriems modelio objektams, yra struktūrizuojama skirstant informaciją į fizines/geometrinės savybes, klasifikacijų kodus, išsidėstymą erdvėje, sąsajas arba duomenis, susijusius su BIM naudojimu tam tikruose procesuose. Atributinė objektų informacija taip pat skirstoma į grupes pagal jų subjektą ir informacijos rinkimą, kuris yra nuoseklus pagal taikymo sritį/tikslą tam tikrose projekto ciklo stadijos ir tai yra apibrėžiama atsižvelgiant į informacijos lygį LoI (angl. *Level of Information*). Tokios standartizuotos ir struktūrizuotos informacijos tikslas yra suteikti gaires, kad būtų užtikrinta, jog visi BIM modeliai ir jų turinys paruošti valdymui skaitmeniniu būdu su pastovia standartizuota bendra duomenų struktūra. Taip būtų įmanoma surinkti ir išlaikyti duomenų informaciją ir vėliau ją iš naujo panaudoti asmenims dalyvaujantiems projekto valdymo cikle (projektavimo, statybos ar valdymo stadijose).

Atributinės informacijos struktūrizavimas ir išskaidymas į įvairias disciplinas yra labai svarbus proceso cikle, nes duomenys bus naudojami perkeltiant juos iš PIM (projekto informacinis modeliavimas) į AIM (atributinis informacinis modeliavimas (2.11 pav.)).



2.11 pav. Informacijos srautai iš statinio informacinio modelio (RB Rail AS 2019)
Fig. 2.11. Information flows from the building information model (RB Rail AS 2019)

Svarbu paminėti, kad informacija yra saugoma ne tik pačiuose failuose bet ir BIM geometriniam modelyje. Geometriniam modelyje atributais galima suklasifikuoti tokius duomenis kaip plotai, kambariai, įstaigos įranga, baldai ir jų išdėstymas erdvėje ir pan.

Skaitmeninio modelio geometrijos informacija gali būti taip įtraukta į AIM. Norint eksportuoti geometrinį modelį, informacija turi būti eksportuojama iš atvirojo failo formato (pvz., IFC) (2.12 pav.).

Informacija perduodama dviem etapais:

- Atributinių duomenų eksportas: Kiekvienos atskiros sistemos (architektūros, elektros, šildymo, vėdinimo ir kt.) geometriniai modeliai turi nustatytą atributinę informaciją, kurią galima susieti tarp įvairių sistemų, sugrupuoti, atrinkti bei eksportuoti į kitas duomenų valdymo sistemas.
- 3D geometrijos eksportas: BIM objekto geometrijos yra eksportuojamos kaip objektai, kurie saugomi turto valdymo duomenų bazėje. Šąsaja valdoma siejant su Objekto ID/objekto kodu/ atributo kodu priklausomai nuo to, kaip atributinės informacijos duomenų bazės valdymo sistema valdo BIM objektų importą.

Uniclass 2015 sistema suskirstyta į lentelių rinkinį, kuris gali būti naudojamas informacijai filtruoti pagal kainas, objektų sugrupavimui ir t. t., taip pat ruošiant specifikacijas ar kitus produkcijai reikalingus dokumentus.

Subjektai gali būti apibūdinami naudojant erdves/lokaciją ir veiklos lenteles, jei to reikalaujama. Linijiniai subjektai taip pat gali būti apibūdinami naudojant sistemos lentelę. Pagrindiniai architektūriniai subjekto elementai yra stogas, sienos, grindys ir t. t. Kiti reikalavimai subjektui tokie kaip drenažo sistema, šildymas ar ventiliacija, yra įtraukti į funkcijas, kurios yra elementų lentelės dalis, pavadinta elementai/funkcijos. Funkcijos gali būti naudojamos pradinėse projekto stadijose, kad galima būtų apibrėžti, kokių paslaugų reikalaujama, taip pat gali būti naudojama aspektams apibūdinti turto valdytojui.

„OmniClass“ statybos klasifikavimo sistema sukurta ir naudojama Šiaurės Amerikos architektūros, inžinerijos ir statybos pramonėje, kurioje pateikiamos statybos sistemų struktūrizavimo taisyklės, statybos darbų ir paslaugų komponentų klasės ir kodavimo principai. Visų nagrinėjamų klasifikavimo sistemų – OmniClass, Uniclass 2015 – tikslai ir paskirtis yra vienoda: jos teikia standartizuotus kodavimo pagrindus klasifikuojant informaciją tam tikra struktūra per visą statinio gyvavimo ciklą, pradedant nuo idėjos iki griovimo ar rekonstrukcijos ir apimant visus statybos etapus.

Tačiau Lietuvoje nėra reikalavimo taikyti klasifikuotą kodavimą atliekant projektavimo ir statybos darbus.

2.5. Pastatų energijos simuliacijos modelio kūrimas naudojant aktyvų statinio informacinį modeliavimą

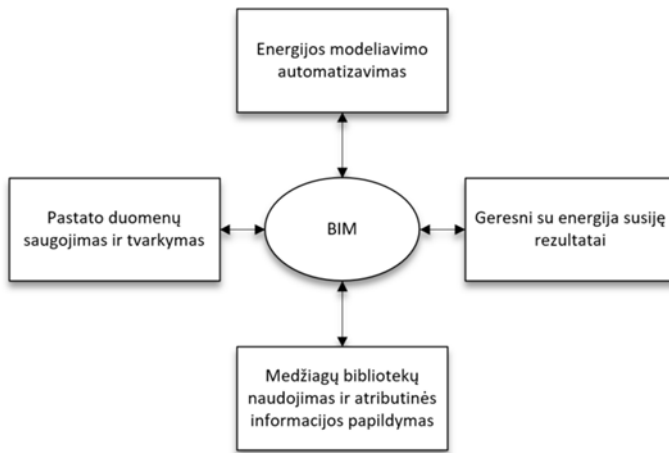
Pastatų energijos modeliavimas (BEM), tai – BIM sistemos pogrupis. Šis pogrupis integruoja energijos analizę į projektavimą, statybą, valdymą ir pastatų priežiūrą. Yra įvairių prieinamų BEM įrankių, todėl yra poreikis įvertinti šių įrankių naudingumą pastato gyvavimo ciklo įvairiose fazėse (Reeves *et al.* 2015). Pastatų našumo analizės integracija į projektavimą, statybą, valdymą ir pastatų priežiūrą yra labai svarbi (Attia *et al.* 2012, AIA 2012, Hemsath 2013).

Dauguma svarbiausių sprendimų, susijusių su energijos efektyvumu yra padaromi anksti dar prieš projektavimo procesą (Kreider *et al.* 2010, Chong *et al.* 2017, Somboonwit *et al.* 2017, Pinheiro *et al.* 2018). Kuo ankstesnės BEM simuliacijos yra atliekamos projektavimo procese, tuo daugiau energijos galima sutaupyti vėlesnėse projekto stadijose (Young *et al.* 2009, Maile *et al.* 2007). BEM simuliacijos gali būti naudojamos vertinant energijos naudą įvairiose projektavimo alternatyvose. Tai padeda projektuotojams ir savininkams padaryti geresnius sprendimus, susijusius su pastatų funkcijų atlikimu (Ramaji *et al.* 2016, Somboonwit *et al.* 2016), ir nustatyti gyvavimo ciklo kainos naudingumą

(Nawari, Kuenstle 2015). Projektuotojai naudoja BEM kaip projektavimo įrankį tam, kad įvykdžius energetines simuliacijas galima būtų gauti reikalingą statinio energijos klasę (Somboonwit *et al.* 2017).

Statybų industrija labiausiai lemia ekonomiką pasaulyje, įvertinus gamybos bei atliekų produkciją (Gervasio *et al.* 2014). Populiacijos augimas ir išteklių stoka sukūrė ilgaamžių pastatų didėjančių poreikį visame pasaulyje. Pastatas labai lemia aplinkosaugos, ekonomikos ir socialines tvarumo sampratas, nes naudojamos medžiagos statybose turi didelę įtaką. Įtraukimas šių aspektų ankstyvose projektavimo stadijose pasiekiamas tvariu projektavimu, kurio metu projektuotojai turi identifikuoti tvariausias pastato medžiagas ir sistemas įvertinę ir užsakovo reikalavimus (Jrade, Jalaei 2013). Tvari statyba turėtų būti apžvelgta kaip integruoto projektavimo forma, kur visi projekto komponentai yra įvertinti visapusiškai, o ne individualiai. Poreikis tvarumui tapo nepaprastai sunkus dėl kelių priežasčių, viena iš jų yra laiko tvarumas darant sprendimus. Nors kritiškiausias laikas daryti sprendimus dėl pastato tvarumo yra ankstyvoje projektavimo stadijoje, šių dienų praktikoje pastato funkcijų analizė dažniausiai atliekama užbaigus projektavimo dokumentus. Tokia praktika baigiasi prarastomis galimybėmis maksimaliai padidinti pastato projekto tvarumą (Zanni *et al.* 2014). Brangių ir daug laiko reikalaujančių projektavimo modifikacijų reikia kad būtų pasiekta nustatytų funkcijų atlikimo kriterijai. Gervasio (Gervasio *et al.* 2014) išaiškino požiūrio į gyvavimo ciklo svarbą projektavimo proceso pradžioje, kad būtų pasiekti tvarūs tikslai, pabrėžiant tą faktą, kad kuo anksčiau atliekamas vertinimas, tuo didesnis potencialas efektyviai lemti statinio gyvavimo ciklą. CO₂ išsiskyrimo pastato gyvavimo cikle tyrimai atliekant modernizaciją yra labai svarbūs. Kadangi atnaujinimo procesai susiduria su dideliu kiekiu duomenų, o BIM technologija pagrįsti įrankiai yra fragmentuoti, atsiranda rizika nesutapimų ir klaidų. Atskiri BIM pagrįsti modeliai sąveikauja su integruotais modeliais inžinerijos sistema remiantis skaitinėmis simuliacijomis ir virtualiomis imitacijomis, kad būtų sugeneruoti ir įvertinti tvarūs sprendimai (Wong 2014). Skaitmeninės simuliacijos ir virtualios imitacijos yra atliekamos naudojant optimizacijos modelį (Gokce, Gokce 2014). Tad BIM taikymas BEM aplinkoje turi daug privalumų. BIM panaudojimas su energija susijusiu modeliavimu, simuliacijomis ir informacijos srautais supaprastina duomenų tvarkymą, kuris gali paskatinti energijos modeliavimą atlikti automatizuotai, geriau pateikti rezultatus bei gebėti saugoti ir tvarkyti naujus pastatų duomenis (2.13 pav.), siekiant, kad būtų atnaujintas energijos modelis ir patobulintos sukauptos duomenų bazės informacija, įtraukiant naujus atributus į įprasto energijos modeliavimo procesą (Kamel, Memari 2019).

Siūlomas modelis, pagrįstas BIM technologija, palengvina sprendimų priėmimo procesą atliekant pastato modernizacijos darbus lyginant su tradiciniais metodais, kurie yra šiuo metu taikomi.



2.13 pav. BIM sąveika su pastatų energijos valdymu (Kamel, Memari 2019)

Fig. 2.13. BIM interaction with building energy management (Kamel, Memari 2019)

Prieš priimdama tikslių sprendimą projekto komanda turi surinkti duomenis, atlikti matavimus ir kitus tyrimus statybų aikštelėje, o tam reikia daug pastangų ir laiko. Be to, atnaujinti matavimai pasirenkami dažniausiai remiantis patirtimi bei analogiškais įvertinimais. Energijos modeliavimo ir kainos įvertinimai yra atliekami serijomis, todėl keli skaičiavimo ciklai yra būtini. Modernizacijos procesas, pagrįstas siūlomu metodu (2.14 pav.), skiriasi nuo tradicinio šiais aspektais:

1. Atliekamas pastato auditas įvertinant esamo pastato būklę: pastato konstrukcijos, inžinerinės sistemos naudojamos pastate ir kita informacija. Tokiam vertinimui atlikti galima pasitelkti kombinuotą šių duomenų surinkimą – atliekant standartiniu būdu kartu su fotogrammetrinio 3D modelio pagrindu. Toks būdas ne tik paspartintų duomenų gavimą ir apdorojimą, tačiau ir padidintų šių duomenų tikslumą, nes sukurta 3D skaitmeninį fotogrammetrinį modelį galima panaudoti atliekant pastato fasado, stogo ploto skaičiavimus, įvertinant išorinių konstrukcijų ar kitų pašalinių inžinerinių įtaisų (kondicionieriai), montuojamų ant išorinių pastato sienų, padėtį ar net jų vizualią būklę.

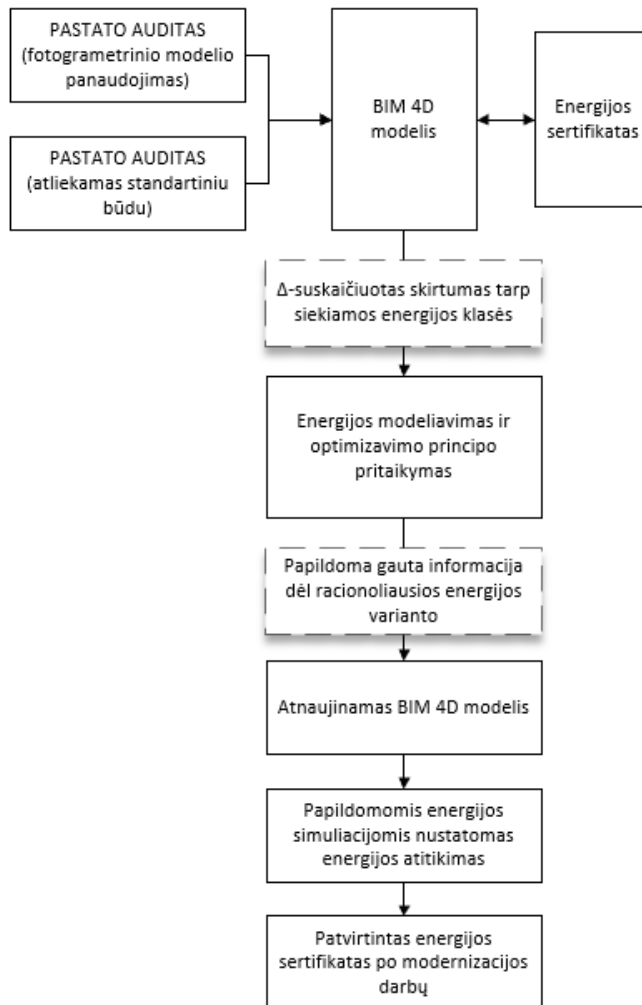
2. Skaičiuojama pirmiausiai nustačius siekiamos pastato energijos klasę, kurią reikia gauti atlikus modernizacijos darbus. Šiais skaičiavimais įvertinami skirtumai tarp reikalaujamų ir esamų pastato konstrukcijos energijos šilumos rodiklių. Pastebėti šie trūkumai išreiškiami intervalo vertėmis, energijos atlikimo parametrais.

3. Šios modernizacijos būdas yra pagrįstas MCDM metodu ir sprendimų medžio modeliu, kad galima būtų pasiekti planuojamą energijos atlikimo lygį ir

rasti optimalų atsinaujinimo variantą atnaujinimui. Energijos modeliavimas ir daugybė optimizavimo kriterijų yra atliekami vienu skaičiavimo ciklu ir susieti su duomenų bazėmis.

4. Atliekant galutinį vertinimą, pasitelkiami energijos simuliacijos rezultatai, kurie pristatomi alternatyvių sprendimų kombinacijomis, prioritetų tvarka. Šios simuliacijos įtraukia išlaidas ir techninius sprendimus.

Siūloma eiga pateikta 2.14 paveiksle yra pagrįsta valdymo sistemos žiniomis.



2.14 pav. Energijos duomenų valdymas pritaikant BIM technologiją pastato modernizacijai

Fig. 2.14. Energy data management with BIM technology for building modernization

Pradžios taškas yra modelis IFC formate (atviras projektavimo formatas) su elementais, apibrėžtais geometriškai. Projektavimo metu projektuotojas gali pridėti įvairių pastato elementų prie esamo modelio. Nauji elementai gali būti redaguojami. Jie iš pradinio modelio gali būti modifikuojami iki tam tikro masto, bet negali būti pašalinami iš modelio. Energijos skaičiavimai yra paremti dviem strategijomis. Pirma, konceptualioje stadijoje nustatant energijos klasę pagal pasirinkto modelio parametrus sprendimo problemai spręsti – tinkamų parametrų pastato elementams atitinkamai energijos klasei nustatymas. Siekiant gauti efektyvių alternatyvų kombinacijas, tolesnėms analizėms reikia taikyti sprendimų medžio modelio ir SyMAD-3 metodus, kuriais siekiama atlikti efektyvių alternatyvų atranką. Antra, kai pradinis rinkinys efektyvių alternatyvų kombinacijų yra nustatytas, modelis bus pakeistas – papildytas papildomais duomenimis, reikalingais visapusiškai analizei įskaitant aplinkosaugos poveikio kriterijus, šildymo, vėdinimo ir kitas sistemas, kainas, trukmę, technologinius parametrus ir kitus apibrėžtus duomenis. Sąsajos su duomenimis paremta informacija turi būti detalizuojamos šioje stadijoje. Patobulinto modelio informacija perduodama toliau sertifikuoti ir atliekama detali energijos analizė. Duomenys specifikuojami energijos analizės metu ir keliauja į paskutinę stadiją – alternatyvių sprendimų daugiakriterę papildyto modelio analizę.

BIM metodu pagrįstas modernizacijos modelis įtraukia į simuliacijos procesą sistemos valdymo komponentus. Įvertinama energijos analizė, gyvavimo ciklas, išlaidų skaičiavimas, planavimas. Tokia sistema įtraukia medžiagų ir sistemų duomenų bazes su susijusia informacija.

Automatizuotas modernizacijos įrankis suteikia galimybę atlikti pastatų modernizacija greičiau ir tiksliau, išvengiant klaidų ir informacijos netekties. Tai suteikia galimybę sprendimų priėmėjui atlikti projektavimo ir modernizacijos procesą greičiau ir tiksliau nei įprasta. Nepaisant spartaus technologijų tobulėjimo ir statybos standartų kaitos, iššūkių atsiranda dėl proceso automatizavimo nebuvimo ir menko BIM technologijos panaudojimo esamų pastatų modernizacijos darbams.

BIM technologijos sukuria statybos, energetikos ir programinės įrangos valdymo sistemą. Ši technologija taikoma ne tik projektavimo procesuose, bet ir atliekant statybos kainos įvertinimus pagal suprojektuotą pastato modelį

2.6. Tvaraus efektyvumo vertinimas

Šiuolaikiniame sparčios urbanizacijos vystymosi etape yra labai svarbūs tvarios ir ekologiškos aplinkos kūrimas. Susiduriama su daugybe iššūkių, kurie gali turėti įtakos klimato pokyčiams, išteklių trūkumams (Salih 2013). Infrastruktūra ir miesto plėtros pramonė yra svarbi formuojant norimą mūsų planetos ateitį. Šis

sektorius vaidina gyvybiškai svarbų vaidmenį kuriant vertę visuomenei, žmonėms novatoriškus ir socialinius sprendimus. Pasaulyje daugybė žmonių keliai gyventi į miestus, kur jiems reikalingas sveikas, įperkamas, tvarus būstas ir infrastruktūra. Tačiau pramonės pastatai ir infrastruktūra sudaro didelę dalį šiltnamio efektą sukeliančių dujų, kurios yra pagrindinė klimato kaitos priežastis. Be to, pramonė yra didžiausia žaliavų vartotoja, dar eikvojanti ribotus gamtinius išteklius. Aplinkos problemų ir statybų pramonės santykis jau buvo įrodytas ir pripažintas mokslo bendruomenės (Dong, Thomas Ng 2015; Jia Wen *et al.* 2015; Li *et al.* 2017).

Gyvenimo ciklas per pastaruosius 20 metų buvo laikomas kaip tvari metodika, galinti kiekybiškai įvertinti ir sumažinti pastatų sistemų poveikį aplinkai ir energijos vartojimą (Singh *et al.* 2009; Perez *et al.* 2008). Norint sumažinti energijos naudojimą šalyje, turi būti laikomasi šios pagrindinės taisyklės – energijos vartojimo efektyvumas pirmiausia, po to naujoviškos energijos tiekimo galimybės, įskaitant atsinaujinančios energijos vartojimą (Chwieduk 2017).

Po dviejų pirmųjų Jungtinių Tautų aplinkos ir darnaus vystymosi konferencijų (Rio de Janeiro 1992, Johannesburg 2002) buvo nustatyti trys pagrindiniai darnaus vystymosi ir statybos aspektai: aplinkos aspektas, ekonominis aspektas ir socialinė bei kultūrinė dimensija (Carvalho *et al.* 2019). Tvarios statybos apibrėžimą pirmasis pateikė Charlesas Kibertas 1994 m. per pirmąją pasaulinę tvarios statybos konferenciją (Florida). Jis tai apibrėžė kaip „atsakingą sveikos pastato aplinkos kūrimą ir valdymą atsižvelgiant į teologinius principus ir efektyvų išteklių naudojimą“. Tvariai statybai buvo nustatyti šie principai (Kibert 1994): sumažinti išteklių sunaudojimą; naudoti atsinaujinančius ar perdirbamus išteklius; saugoti natūralią aplinką; sukurti sveiką ir netoksišką aplinką; siekti kokybės kuriant darnią aplinką.

Dėl nustatytų gairių reikėjo įvertinti pastatų poveikį aplinkai. Todėl kelios organizacijos sukūrė pastatų tvarumo vertinimo metodą, skirtą įgyvendinti ir paskleisti darnias priemones statybos projektams, vertinti ir stebėti eksploatacines pastatų savybes ir rinkti informaciją projektuotojui priimant sprendimus įvairiais projekto etapais (Mateus, Braganca 2011; Haapio, Viitaniemi 2008).

Dažniausiai teigiamas BIM diegimo poveikis statybos sektoriaus tvarumui yra išreiškiamas tvaraus (ekologiško) projektavimo koncepcija (Azhar *et al.* 2011), kuri gali būti apibrėžta kaip sveikos ir kuriančios aplinkos, pagrįstos efektyviu išteklių naudojimu ir ekologiniu projektavimo kūrimu bei eksploatavimu (Kibert 2016).

Be to, tikimasi, kad platesnis BIM technologijų naudojimas turės teigiamą poveikį ne tik aplinkos tvarumo, bet ir ekonominiams bei socialiniams aspektams. Galima teigti, kad BIM tvarumas pasireiškia trimis klasikinėmis dimensijomis:

Aplinkos tvarumas – ekologiškesni viso pastato gyvavimo ciklo sprendimai. Dėl BIM technologijos ypatumo saugoti, apdoroti ir dalytis visa su statyba susijusia informacija galima sumažinti poveikį aplinkai, atsižvelgiant į pastato energijos ir vandens suvartojimą, panaudotas medžiagas statybos metu bei atliekų tvarkymą po atliktų modernizacijos darbų, pastato CO₂ mažinimą ir kt.

Ekonominis tvarumas yra siejamas su ekonominio augimo užtikrinimu, produktyvumo didinimu ir atliekų mažinimu. Daugelis autorių sutelkia dėmesį į ekonominę naudą, kurią BIM teikia investuotojams: ankstyvas galimų problemų nustatymas, geresni inžineriniai sprendimai, efektyvesnė logistika, tikslus išlaidų apskaičiavimas per visą pastato gyvavimo ciklą ir ekonominės perspektyvos nauda.

Socialinis tvarumas – prisidėti prie sveikų bendruomenių kūrimo teikiant priemones pastatų eksploatacijai pagerinti tokiais aspektais kaip: vidaus oro kokybė, triukšmo mažinimas, sauga statybvietyje, tikslesnės ir mažiau trikdančios komunalinės infrastruktūros operacijos, priežiūros darbai. Be to, su tvarumu susijusi informacija nuolat renkama ir analizuojama BIM. Ji gali būti paversta socialinio vartotojų/savininkų įsitraukimo priemone nustatant pastatų bendrus tvarumo tikslus, stebint pažangą ir pasiekimais. Toks BIM naudojimas ne tik prisideda prie ekologiškesnės sukurtos aplinkos, bet ir skatina vartotojų sąveiką, stiprina socialinius ryšius.

Su BIM modeliuojama, tvarkoma ir prognozuojama tokie statybos aspektai, kaip atliekų tvarkymas, patalpų oro kokybė, apsauga statybų metu, erozija ir kt. Visa tai yra susiję su dideliu specifinių duomenų integravimu (Kibert 2016). Kitaip tariant, BIM indėlį į tvarų projektavimą galima apibendrinti penkiais punktais: geresnis sprendimų priėmimas, geresnė analizė, lengvesnė prieiga prie informacijos, geresnis suinteresuotų šalių bendravimas ir paprastesnis sertifikavimas. Todėl visuomenės interesas yra tas, kad kuo daugiau projektuotojų pritaikytų BIM technologijas savo praktikoje.

BIM diegimo tyrimai (Yan, Damian 2008) padėjo įvertinti jo pranašumus ir trūkumus. Be to, atlikta ir papildomų tyrimų JAV ir JK šalių architektūros, inžinerijos, statybos, valdymo įmonėse (Aladag *et al.* 2016, Jia *et al.* 2017), pateikus klausimyną ir įtraukus projektuotojus, inžinierius ir statybos kompanijas. Tik 25 % apklaustųjų iš JAV ir JK pažymėjo, jog BIM pranašumas – trumpesnis projektavimo laikas, 25 % apklaustųjų manė, jog BIM technologijos taikymas sumažintų patiriamas išlaidas, tačiau net 40 % apklaustųjų iš JAV ir 20 % iš JK manė, jog jų firmos darbuotojų mokymas dirbti su šia technologija atims daug laiko. Organizacijų, įmonių priimti sprendimai dėl BIM technologijos panaudojimo dažniausiai yra pagrįsti verslo perspektyvų (Reizgevičius *et al.* 2018), tad reta statybos įmonė ryžtasi investuoti į šios technologijos diegimą, nes neturi informacijos dėl galimos finansinės naudos. Yra nustatyti pagrindiniai veiksniai, kurie lemia BIM technologijos diegimą įmonėje (Sen 2012):

- geresni projekto rezultatai;
- efektyvesnis bendradarbiavimas naudojant 3D vizualizacijas;
- personalo produktyvumo didinimas;
- teigiamas poveikis laimint naujas sutartis;
- BIM gyvavimo ciklo vertė ir pradinės personalo mokymo išlaidos.

Tie vartotojai, kurie suprato BIM esmę, efektyviai integravo jį į savo vidinius projektavimo procesus (Ning *et al.* 2017). Suomijos nacionalinės valdžios institucijos, vietos valdžios institucijos ir pramonės atstovai pradeda vertinti galimybes, kurios atsiranda įgyvendinant BIM (Tulenheimio 2015). BIM bendrųjų reikalavimų vadovas, išleistas 2012 m., pabrėžė didėjančią poreikį kurti bendrąsias taisykles ir standartizuoti šią technologiją. Šie pradiniai reikalavimai buvo pritaikyti tik pastatams, tačiau jau nuo 2015 metų imta naudoti ir infrastruktūros projektams (Tulenheimio 2015; Bradley *et al.* 2016). Daugelyje pasaulio šalių pastebimas BIM naudojimo skatinimas vyriausybės lygiu (Petri *et al.* 2017). Autoriai (Porwal, Hewage 2013) nurodė atsakingų organizacijų nesugebėjimą standartizuoti ir patentuoti BIM veiklą kaip pagrindinį skaitmeninio diegimo viešajame sektoriuje veiksnį. Lietuvos statybų organizacijos nuomone šia technologija sudaromas planavimas ir projektavimas teikia mažiau klaidų ir racionalesnius sprendimus. Projektavimo procesas yra aukštesnės kokybės ir racionalesnis, ateityje reikės ir mažiau pakeitimų (Čereška *et al.* 2016; Zolfani *et al.* 2016). Skaitmeninio modelio taikymas atliekant pastato projektinius pasiūlymus sumažina klaidų tikimybę, didina galimybes pritaikyti ekologiškus sprendinius, pratęsia statinio ilgaamžiškumą (Książek *et al.* 2015; Bucon, Sobotka 2015; Suder, Kahraman 2016; Cid-López *et al.* 2015; Hattab, Hamzeh 2015), padeda lengviau atlikti tinkamų medžiagų įvertinimą, gaunami rezultatai lengviau suprantami klientams bei visiems dalyviams, kurie yra įtraukti į sprendimo priėmimo procesą (Hattab, Hamzeh 2015).

2.7. Optimizavimo modelio algoritmo kūrimas

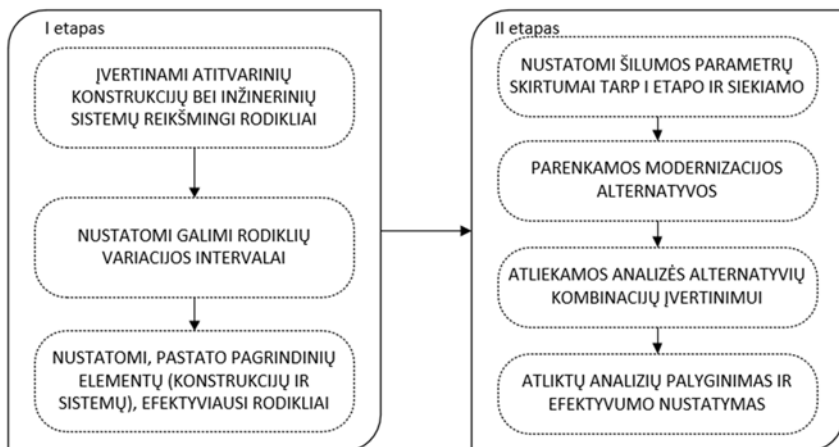
Siekiant įgyvendinti optimizavimo modelį, būtiną suskirstyti jį į atskirus vertinimo procesus, kuriuos tik atlikus galimas pastato elementų energetinių simuliacijų formavimas. Norint pasiekti pastato energetinį naudingumą, reikia prieš atliekant projektavimo darbus nustatyti, kokiai energetinei klasei šiuo metu priklauso pastatas. Pastatai pagal energetinį naudingumą klasifikuojami į 9 klases: A++, A+, A, B, C, D, E, F, G. A++ (STR 2.01.02:2016). Darbo pradžioje būtina nustatyti pagrindinius atitvarinių konstrukcijų ir inžinerinių sistemų analitinio pastato energetinius parametrus. Tuo tikslu sukuriamas pastato energetinės klasės nustatymas (atvirkštinė užduotis) (2.15 pav.).

Vienas pagrindinių žiniomis pagrįstos vadybos sistemos komponentų yra optimizavimo posistemis, apimantis išankstinio alternatyvų pasirinkimo ir sprendimų priėmimo įrankius aptariant koncepciją ir atlikus papildomo modelio energetinę analizę. Konceptualaus etapo metu plėtojama atvirkštinio problemos algoritmo logika iš anksto parinkus alternatyvas. Turi būti identifikuotos konstrukcijų ir inžinerinių sistemų variacijos, atitinkančios energetinio naudingumo klasę, kuri buvo pasirinkta pastatui modernizuoti.

Tai novatoriška sisteminio požiūrio į pastatų modernizaciją koncepcija, kurioje taip pat integruotos ekonomiškai efektyvios technologijos ir ekologiškai efektyvios medžiagos siekiant sumažinti šilumos nuostolius, energijos suvartojimą ir poveikį aplinkai, kartu didinant pastatų atsinaujinančios energijos dalį. Ekspertai, atliekantys pastato ir jo energijos auditą, surenka visus duomenis, apibūdinančius esamą pastato būklę. Šie duomenys kaupiami duomenų bazėje. Iš surinktų duomenų, tokių kaip pastato energijos vartojimas, statybinių konstrukcijų naudojimas, visumos galima įvertinti modernizacijos poreikį ir jo dydį (2.15 pav.).

Pastato modernizacijos priemonių kriterijus nustato ekspertai kartu su pastato valdytoju. Kriterijų dydžius ir svorius ekspertai nustato taikant porinius palyginimus (A priedas).

Kadangi automatizuoto optimizavimo modelio nėra dar sukurta, ir kad jį pilnai integruoti į BIM sistemą reikia nemažai resursų pritaikyti, tad šiam disertacijos tyrimui taikomas optimizavimo modelis paremtas matematiniais skaičiavimais (2.16 pav.), kur įvesties duomenys buvo surinkti rankiniu būdu.

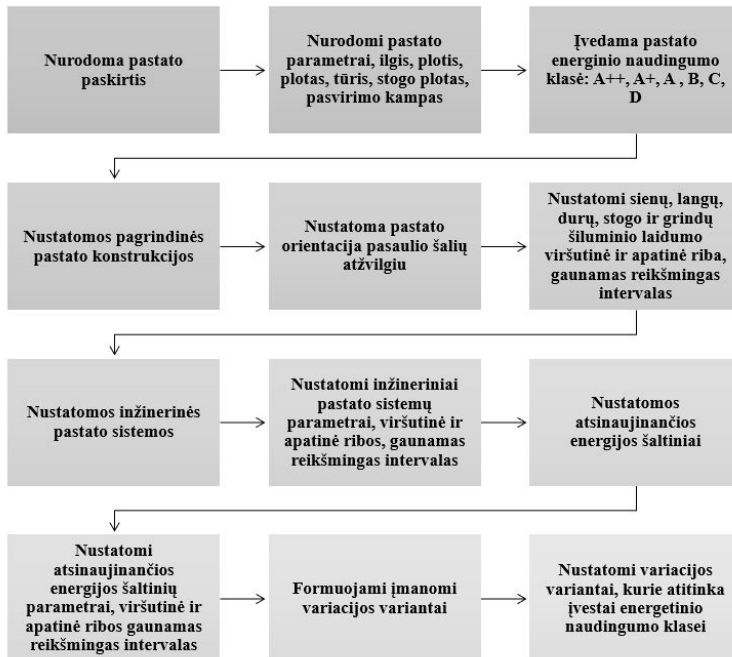


2.15 pav. Pastato modernizavimui siūlomas optimizavimo modelis
Fig. 2.15. Proposed optimization model for the building modernization

2.15 paveiksle pateiktas siūlomas optimizavimo modelio, pastato modernizavimo atlikimui, kuris yra išskaidomas į 2 etapus:

I etapu nustatomi pagrindinių atitvarinių konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientai bei inžinerinių sistemų naudingumo koeficientai.

II etapu iš gautų I etapo rezultato nustatomi energetinę klasę atitinkantys alternatyvų sprendiniai.



2.16 pav. Atvirkštinis energijos vartojimo uždavinys

Fig. 2.16. The task of reverse energy

I etapo proceso skaidymas:

Vertinami pastato parametrai, atitvarinių konstrukcijų variacijos reikšmingi rodikliai:

- maksimalus stogo šilumos perdavimo koeficientas – $U_{st\ max}$;
- minimalus stogo šilumos perdavimo koeficientas – $U_{st\ min}$;
- vidutinis stogo šilumos perdavimo koeficientas – U_{st0} ;
- stogo šilumos perdavimo koeficiento reikšmingas intervalas – ΔU_{st} ;
- maksimalus rūšio grindų šilumos perdavimo koeficientas – $U_{gr\ max}$;
- minimalus rūšio grindų šilumos perdavimo koeficientas – $U_{gr\ min}$;

- vidutinis rūšio grindų šilumos perdavimo koeficientas – $U_{gr\ 0}$;
- rūšio grindų šilumos perdavimo koeficiento reikšmingas intervalas – ΔU_{gr} ;
- maksimalus sienų šilumos perdavimo koeficientas – $U_{sien\ max}$;
- minimalus sienų šilumos perdavimo koeficientas – $U_{sien\ min}$;
- vidutinis sienų šilumos perdavimo koeficientas – $U_{sien\ 0}$;
- sienų šilumos perdavimo koeficiento reikšmingas intervalas – ΔU_{sien} ;
- maksimalus langų, durų šilumos perdavimo koeficientas – $U_{lan\ max}$;
- minimalus langų, durų šilumos perdavimo koeficientas – $U_{lan\ min}$;
- vidutinis langų, durų šilumos perdavimo koeficientas – $U_{lan\ 0}$;
- langų, durų šilumos perdavimo koeficiento reikšmingas intervalas – ΔU_{lan} .

Taip pat formuojami inžinerinės sistemos variacijos reikšmingi rodikliai:

- maksimalus vėdinimo sistemos naudingumo koeficientas – $\eta_{re\ max}$;
- minimalus vėdinimo sistemos naudingumo koeficientas – $\eta_{re\ min}$;
- vidutinis vėdinimo sistemos naudingumo koeficientas – $\eta_{re\ 0}$;
- vėdinimo sistemos naudingumo koeficiento reikšmingas intervalas – $\Delta \eta_{re}$;
- šildymo sistemos šaltinis (dujinis katilas, centrinis mazgas, elektra ir t.t.) – S_{sist} ;
- šilto vandens ruošimo šaltinis (dujinis katilas, centrinis mazgas, elektra ir t.t.) – V_{sist} ;
- šalto oro ruošimo šaltinis (kondicionieriai, šaldymo kamera ir t. t.) – O_{sist} ;
- nustatomos atsinaujinančios energijos šaltiniai – A_{sist} .

Tyrime išnagrinėti 6 poveikio veiksniai:

- stogo šilumos perdavimo koeficientas;
- rūšio grindų (cokolio) šilumos perdavimo koeficientas;
- sienų šilumos perdavimo koeficientas;
- langų bei durų šilumos perdavimo koeficientas;
- vėdinimo sistemos naudingumo koeficientas;
- patalpų energijos sąnaudos.

Tiriamas stogo šilumos perdavimo koeficientas nustatomas 3 parametru lygiais:

- apatinė, vidutinė ir viršutinė reikšmės (0,15; 0,2; 0,25);
- rūšio grindų (cokolio) šilumos perdavimo koeficiento 3 lygiai (0,25; 0,3; 0,35);
- sienų šilumos perdavimo koeficiento 3 lygiai (0,2; 0,25; 0,3);
- langų bei durų šilumos perdavimo koeficiento 3 lygiai (1,2; 1,6; 2);

Maksimali viršutinė stogo šilumos perdavimo koeficiento riba buvo priimta kaip $0,25 \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$, nes tolesnis stogo šilumos perdavimo koeficiento didinimas neatitinka B NRG klasės pastato varianto. Minimali žemutinė riba buvo priimta kaip $0,15 \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$, nes mažesnė šilumos perdavimo koeficiento reikšmė brangino stogo konstrukciją.

Maksimali viršutinė rūšio grindų šilumos perdavimo koeficiento riba buvo priimta kaip $0,35 \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$, nes tolesnis rūšio grindų (cokolio) perdavimo koeficiento didinimas neatitinka B NRG klasės pastato varianto. Minimali žemutinė riba buvo priimta kaip $0,25 \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$, nes mažesnė šilumos perdavimo koeficiento reikšmė brangino rūšio grindų konstrukcijos kainą.

Maksimali viršutinė sienų šilumos perdavimo koeficiento riba buvo priimta kaip $0,3 \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$, nes tolesnis sienų šilumos perdavimo koeficiento didinimas neatitinka B NRG klasės pastato varianto. Minimali žemutinė riba buvo priimta kaip $0,2 \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$, nes mažesnė šilumos perdavimo koeficiento reikšmė brangino sienų konstrukcijos kainą.

Maksimali viršutinė langų, durų šilumos perdavimo koeficiento riba buvo priimta kaip $2 \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$, nes tolesnis langų, durų šilumos perdavimo koeficiento didinimas neatitinka B NRG klasės pastato varianto. Minimali žemutinė riba buvo priimta kaip $1,2 \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$, nes mažesnė šilumos perdavimo koeficiento reikšmė brangino langų, durų konstrukcijos kainą.

Maksimali viršutinė vėdinimo sistemos naudingumo koeficiento riba buvo priimta kaip $0,9 \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$, nes tolesnis vėdinimo sistemos naudingumo koeficiento didinimas neatitinka B NRG klasės pastato varianto. Minimali žemutinė riba buvo priimta kaip $0,7 \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$, nes mažesnė naudingumo koeficiento reikšmė brangino vėdinimo sistemos konstrukcijos kainą.

Tiriant pastato elementų energetinių simuliacijų formavimo metodą pagal planą buvo išanalizuotos šios savybės (jas toliau tapo efektyvumo rodikliais):

$Y1 = U_{st}$ – stogo šilumos perdavimo koeficientas;

$Y2 = U_{gr}$ – rūšio grindų šilumos perdavimo koeficientas;

$Y3 = U_{sien}$ – sienų šilumos perdavimo koeficientas;

$Y4 = U_{lan}$ – langų bei durų šilumos perdavimo koeficientas;

$Y5 = \eta_{re}$ – vėdinimo sistemos naudingumo koeficientas;

$Y6_i \text{ (} i = 1, 2, 43 \text{)} = f(U_{st}, U_{gr}, U_{sien}, U_{lan}, \eta_{re}, S_{sist}, V_{sist}, O_{sist}, A_{sist})$ – patalpų energijos sąnaudos ir NRG klasė (apskaičiuojama naudojant anksčiau išvardintus rodiklius, atmetant variantus ne B klasės).

Formuojama sprendimų priėmimo matrica $X_{i,j}$ (2.3 lentelė).

Šiam matricos variantų racionalumui nustatyti naudojamas SAW metodas. SAW (angl. *Simple Additive Weighting*) metodą gana paprasta pritaikyti. Jo taisyklės ir taikymo būdas buvo aprašytos mokslininko MacCrimmono (MacCrimmon 1968^a). Tačiau pagrindinius pritaikymo principus apibūdino mokslininkai Churchmanas, Ackoffas (Churchman, Ackoff, 1954) ir Klee (1971).

2.3 lentelė. Sprendimų priėmimo matrica (žr. A priedą)**Table 2.3.** Decision making matrix (A annex)

Variacijos alternatyvos	Rodikliai (šilumos perdavimo koeficientai)					
	Stogas	Rūsio grindys	Sienos	Langai, durys	Vėdinimo sistema	Energijos sąnaudos kWh/m ² ×met ai
	U_{st}	U_{gr}	U_{sien}	U_{lan}	η_{re}	Y_6
1	$U_{st\ min}$	$U_{gr\ min}$	$U_{sien\ min}$	$U_{lan\ min}$	$\eta_{re\ min}$	Y_{6_1}
2	U_{st0}	$U_{gr\ min}$	$U_{sien\ min}$	$U_{lan\ min}$	$\eta_{re\ min}$	Y_{6_2}
...						
234	$U_{st\ max}$	$U_{gr\ max}$	$U_{sien\ 0}$	$U_{lan\ max}$	$\eta_{re\ max}$	$Y_{6_{234}}$
min. ar max. rodiklis	min	min	min	min	max	min
rodiklio reikšmin-gumas	1	1	1	1	1	1

Išeities duomenys – sprendimų matrica ir reikšmingumo dydžiai. Sprendimų matrica negali turėti neskaitinių reikšmių. Sprendžiama taip:

1. Matrica normalizuojama.

2. Normalizuotosios matricos to paties varianto kiekvienas narys dauginamas iš jo reikšmingumo ir sudedamas su kitais alternatyvos (eilutės) nariais. Gauta suma dalijama iš svorių (reikšmingumo) sumos.

Pradiniai duomenys yra sprendimo matrica ir kiekvieno efektyvumo rodiklio reikšmingumai $\bar{q} = \{\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_n\}$, kurie turi atitinka sąlygą (Churchan, Ackoff 1954):

$$\sum_{j=1}^n q_j = 1. \quad (2.4)$$

Sprendimo matricos nariai normalizuojami pagal šią formulę, jei matricos nariai maksimizuojami:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{max}}. \quad (2.5)$$

Jei sprendimų priėmimo matricos nariai minimizuojami, skaičiavimai atliekami pagal šią formulę:

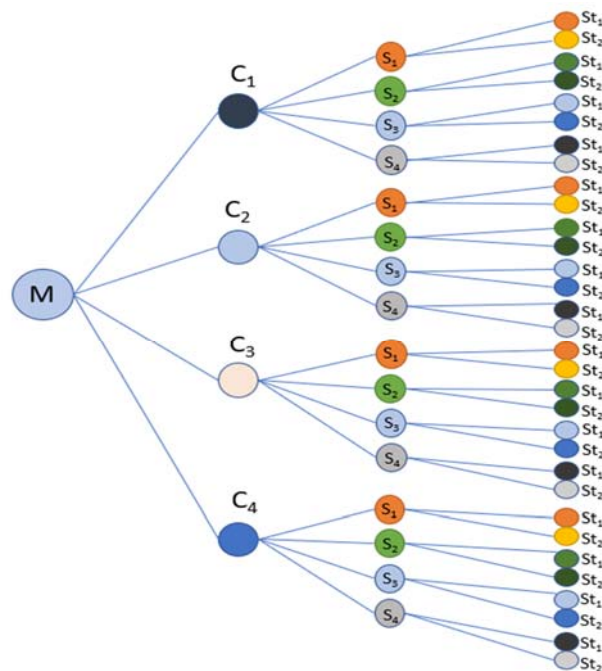
$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_j^{\min}}{x_{ij}}, \quad (2.6)$$

čia x_{ij} – sprendimų priėmimo matricos nariai; \bar{x}_{ij} – normalizuotosios matricos nariai; i – alternatyva; m – alternatyvų skaičius; j – rodiklis; n – rodiklių skaičius; x_j^{\max} – maksimali rodiklio reikšmė; x_j^{\min} – minimali rodiklio reikšmė; q_j – integruotasis reikšmingumas.

Variantų racionalumas nustatomas paprastuoju sudedamuoju svorio SAW metodu (MacCrimmon 1968^a).

Nustatant varianto racionalumą, atitinkami normalizuotosios matricos nariai dauginami iš reikšmingumų ir sumuojami. Racionalaus varianto sandaugų suma bus maksimali:

$$A = \left\{ A_i \left| \max_i \sum_{j=1}^n \bar{q}_j \bar{x}_{ij} / \sum_{j=1}^n \bar{q}_j \right. \right\}. \quad (2.7)$$



2.17 pav. Pastato modernizacijai skirtas sprendimo priėmimo medis. M – modernizacijos variantas, C_n – cokolio variantas, S_n – sienos variantas, St_n – stogo variantas

Fig. 2.17. A fragment of decision tree used for selection of alternative combinations of modernization measures. M – modernization option, C_n – plinth option, S_n – wall option, St_n – roof option

Antrame etape nustatoma kokiomis priemonėmis (konstrukciniais sprendimais) galima pasiekti apibrėžtą pirmame etape sprendimą. Alternatyvių modernizavimo priemonių kriterijus nustato ekspertai kartu su pastato valdytoju. Porinio lyginimo metodu, ekspertai nustato rodiklių reikšmingumo reikšmes.

Suformuojami modernizacijos priemonių alternatyvūs deriniai taikant sprendimų priėmimo medžio modelį (2.17 pav.). Šis modelis nustato galimus izoliacijos derinius cokoliui, sienoms ir stogui. Deriniams gali būti naudojama keletas variantų. Daugiakriterių alternatyvų vertinimo metodu siūloma atrinkti naudojant SyMAD-3 metodą, kuriuo galima pasirinkti iš sudarytų alternatyvų efektyviausią variantą. Taikant sprendimo priėmimo medžio principus, sugeneruojama daug alternatyvių derinių, tad pasitelkiamas alternatyvių prioritetų eiliškumo sąrašas. Alternatyvių derinių energijos poreikio analizė modernizacijai turės įtakos statinio energijos sąnaudoms. Tad tik sprendimų priėmėjas parenka geriausią alternatyvą, kuri turi atitikti efektyvumo rodiklių reikšmes (energijos sąnaudos, kaina ir kt.).

2.7.1 Rodiklių reikšmingumo nustatymas

Porinio lyginimo metodu nustatomas rodiklių efektyvumo reikšmingumas. Taikant optimizavimo uždavinį nustatomos skaitinės subjektyvių rodiklių reikšmingumo reikšmės $q_j (j = \overline{1, n})$:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (b_{ij} \bar{q}_j - \bar{q}_i)^2 \right\}, \quad (2.8)$$

čia b_{ij} ekspertų porinių rodiklių R_i ir R_j lyginimas; $i, j = \overline{1, n}$. Šis rodiklis reiškia i -tojo ir j -ojo rodiklių eksperto įverčių reikšmingumo santykį. Papildoma sąlyga::

$$\sum_{i=1}^n \bar{q}_i = 1. \quad (2.9)$$

Surinkta informacija susisteminama naudojant porinio lyginimo matricas. Kiekvienai pastato konstrukcinei daliai buvo nustatytas reikšmingumas ir pagal svarbą išrikiuoti rodikliai. Ustinovičiaus ir Zavadsko knygoje (Ustinovičius, Zavadskas 2004) yra pateiktas rodiklių reikšmingumo nustatymo metodas.

Nagrinėjamo pastato modernizacijos efektyvumui nustatyti pasirinkti rodikliai pateikti A priede. Visuomeniniam pastatui modernizuoti parinkti rodikliai yra pateikti 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Nustatomi efektyvumo rodikliai, analizuojant alternatyvias modernizacijos priemones

Table 2.4. Criteria for the analysis of alternative measures of modernization

Rodikliai	Matavimo vienetai
Šilumos perdavimo koeficientas	W/m^2K
Modernizacijos kaina	EUR
Prognozuojamas priemonės gyvavimo trukmė	m
Galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniškumą	balais
Metiniai sutaupymai	$kWh/m^2/m$
Paprastoji atsipirkimo trukmė	m
Konstrukcijos storis*	mm

* taikoma tik cokoliui, išorinėms sienoms ir stogui.

2.7.2. Pastato konstrukcijų modernizacijos sprendimų sintezės metodas

Efektyviausių alternatyvų atranka iš visų galimų (iš atitinkamai surinktos kriterijų informacijos) yra sprendimo priėmimo procesas. Šio darbo sprendimo priėmimo procesui yra pasirenkamas daugiakriterių sprendimų sintezės metodas – SyMAD-3 (Simanavičienė *et al.* 2012). Taikomi kiekybiniais matavimais pagrįsti daugiakriteriai sprendimo priėmimo trys metodai, kad būtų gautas sprendimo patikimumas.

SyMAD-3 metodo paskirtis yra daugiakriterių sprendimų sintezė, kurioje naudojami trys daugiakriteriai sprendimo metodai (Simanavičienė *et al.* 2012; Simanavičienė *et al.* 2014). Sprendimų analizės struktūra yra pateikta kaip daugiapakopis sprendimų medis (2.17 pav.) Ši analizės medžio diagrama aprašoma tokiais principais:

- sprendimų analizės pakopų aibė $K = \{k\}$, ($k = 1, 2, \dots, c$), k – pakopos numeris, c – pakopų skaičius;
- kiekvienoje pakopoje esančių sprendimų medžio mazgų skaičius – m_k ($k = 1, 2, \dots, c$) nustatomas atsižvelgiant į sprendimų lentelių skaičių;
- sumodeliuoto sprendimų medžio šakų, kurios jungia šakninį mazgą su galiniu mazgu (vadinamu lapu), skaičius: $z = m_c$, kur m_c – paskutinės sprendimų medžio pakopos mazgų skaičius. Medžio šakų skaičius – tai alternatyvių kombinacijų skaičius.

Turint sprendimų analizės modelį ir reikiamus duomenis, galima pradėti racionalaus sprendimo nustatymo procesą, t. y. pasirinkus atitinkamą algoritmą,

nagrinėjamas alternatyvas išrikiuoti pagal racionalumą – *SyMAD-3*. Pateikto metodo algoritmą sudaro II sprendimo etapai.

I sprendimo etapas skirtas uždaviniui formuluoti, skaičiavimo duomenims paruošti ir atlikti pirminį alternatyvų įvertinimą. Šį etapą sudaro šeši žingsniai:

1. Sprendimo etapų nustatymas, efektyvumo rodiklių sistemos kiekvienai sprendimo medžio pakopai $K = \{k\}$, ($k = 1, 2, \dots, c$) formavimas. Kiekvienos sprendimo pakopos sprendimo lentelių sudarymas, čia m_k – k -toje pakopoje esančių sprendimo lentelių skaičius. Naudojant šias duomenų lenteles, formuojamos sprendimų matricos:

$$X_t = [x_{ij}^t], (t = \overline{1, m_k}; i = \overline{1, a_t}, j = \overline{1, n_k}), \quad (2.10)$$

čia t – sprendimo lentelės numeris, a_t – t -tosios sprendimų lentelės alternatyvų skaičius, n_k – k -tosios pakopos efektyvumo rodiklių skaičius.

2. Ekspertų porinio lyginimo metodu sudarytų matricų, naudojamų efektyvumo rodiklių reikšmingumui nustatyti, užpildymas.

$$E = \{p\}, p = 1, 2, \dots, e_p, \quad (2.11)$$

čia E – ekspertų aibė, p – eksperto numeris, e_p – ekspertų skaičius. Pilnas klasikinio porinio lyginimo metodas yra pateiktas Ustinovičiaus ir Zavadsko knygoje (Ustinovičius, Zavadskas 2004).

3. Porinio lyginimo metodu sudarytų matricų darnos nustatymas. Tam imama kiekviena matrica ir skaičiuojamas jos darnos laipsnis S :

$$S = \frac{S_I}{S_A}, \quad (2.12)$$

čia S_I – matricos darnos indeksas, S_A – atsitiktinio indekso vidurkis.

Jeigu $S < 0,1$ – matricos darna yra pakankama ir matrica naudojama rodiklių subjektyvaus reikšmingumo reikšmių nustatymui, jeigu ne – matricos duomenys tolesniems skaičiavimams nenaudojami (Saaty 1994).

4. k -tosios pakopos rodiklių reikšmingumo reikšmių nustatymas. Naudojant ekspertų užpildytas rodiklių porinio lyginimo matricas ir mažiausių jų kvadratų metodą, apskaičiuojamos rodiklių subjektyvaus reikšmingumo \bar{q}_{kj} , ($j = \overline{1, n}, k = \overline{1, c}$) reikšmės. Remiantis rodiklių subjektyvaus reikšmingumo reikšmių informacija, tikrinama ekspertų nuomonių dėl rodiklių reikšmingumo reikšmių darna, skaičiuojant konkordancijos koeficientą. Jeigu ekspertų nuomonių dėl rodiklių reikšmingumo reikšmių darna pakankama, toliau skaičiuojamos

rodiklių integruoto reikšmingumo reikšmės $q_{kj}^*, (j = \overline{1, n_k}, k = \overline{1, c})$.

Jeigu ekspertų nuomonės dėl darnos nepakanka – svarstoma ekspertų grupės sudėtis. Rodiklių skaičiavimas atliekamas pakartotinai su atnaujintos ekspertų grupės duomenimis.

5. Naudojant ankščiau sudarytas sprendimo matricas $X_t = [x_{ij}^t] (t = \overline{1, m_k}; i = \overline{1, a_t}, j = \overline{1, n_k})$ ir rodiklių integruoto reikšmingumo reikšmės $q_{kj}^*, (j = \overline{1, n_k}, k = \overline{1, c})$ atliekamas alternatyvų racionalumo nustatymas trimis metodais: TOPSIS, SAW, COPRAS.
6. Atlikus skaičiavimus visais trimis metodais, rezultatai pateikiami santykinio reikšmingumo kriterijų pavidalu pagal TOPSIS, SAW ir COPRAS metodus, nesumuojant:

$$(A_k^i [TOPSIS, SAW, COPRAS]) = (R_{kT}^i, R_{kS}^i, R_{kC}^i), \quad k = \overline{1, c}, i = \overline{1, m_k}, \quad (2.13)$$

II sprendimo etapas skirtas alternatyvių kombinacijų sudarymui ir jų racionalumo įvertinimui. Naudojant I sprendimo etape gautų alternatyvų, aprašytų sprendimo lentelėmis A_k , racionalumo įvertinimo rezultatus ir sprendimų medžio modelį, sudaromos alternatyvios kombinacijos $B_s, (s = \overline{1, z})$.

II etapą sudaro trys žingsniai:

1. Alternatyvių kombinacijų duomenys pateikiami vektoriniu pavidalu:

$$B_s = \{(R_{1,T}^i, R_{1,S}^i, R_{1,C}^i), \dots (R_{c,T}^i, R_{c,S}^i, R_{c,C}^i)\}, i = \overline{1, m_k}, k = \overline{1, c}. \quad (2.14)$$

2. Sprendimų lentelės pildomos gautomis alternatyvomis, šie duomenys vėliau bus naudojami tolesniems skaičiavimams.
3. Atliekamas alternatyvių kombinacijų vertinimas (TOPSIS, SAW, COPRAS). Sudaroma sprendimų matrica:

$$Y = [B_s] = [y_{sl}], s = \overline{1, z}, l = \overline{1, k \times m_t}, \quad (2.15)$$

čia m_t – taikomų metodų skaičius, k – pakopos numeris, ($k = 1, 2, \dots, c$). Šiuo atveju s – matricos Y eilučių skaičius, l – matricos Y stulpelių skaičius.

$$(y_{sl}) = (R_{ij}^{k_l}), k = \overline{1, c}, i = \overline{1, m_k}, l = \overline{1, k \times m_t}. \quad (2.16)$$

Sudaroma rodiklių, reikalingų matricoje Y pateiktoms alternatyvoms įvertinti, aibė: $R = \{R_l\}$, ($l = 1, 2, \dots, k \times m_t$).

Optimali šio rodiklio reikšmė yra maksimumas ir jų reikšmingumo vertės reikšmės įtakos nedaro nei subjektyvūs, nei objektyvūs faktoriai. Rodiklių reikšmingumo reikšmės turi atitikti sąlygą:

$$\sum_{l=1}^{k \times m_t} w_l = 1, \quad (2.17)$$

čia k – pakopų skaičius, m_t – metodų skaičius.

2.5 lentelė. Alternatyvių derinių sprendimų lentelė

Table 2.5. Alternative combinations decision table

Pakopos	I pakopos			...			c-osios pakopos		
Rodikliai	$R_{[1]}$	$R_{[2]}$	$R_{[3]}$	...	...	...	$R_{[7]}$	$R_{[8]}$	$R_{[9]}$
Alternatyva									
B₁	$R_{1,T}^{1_1}$	$R_{1,S}^{1_1}$	$R_{1,C}^{1_1}$	...	...	...	$R_{c,T}^{1_t}$	$R_{c,S}^{1_t}$	$R_{c,C}^{1_t}$
...
B_z	$R_{1,T}^{a_t}$	$R_{1,S}^{a_t}$	$R_{1,C}^{a_t}$	...	...	...	$R_{c,T}^{a_t}$	$R_{c,S}^{a_t}$	$R_{c,C}^{a_t}$
Min/max	<i>Max</i>	<i>Max</i>	<i>Max</i>	...	...	...	<i>Max</i>	<i>Max</i>	<i>Max</i>

Atlikus alternatyvių kombinacijų vertinimą ankščiau minėtais metodais, lentelėje pateikiama alternatyvių kombinacijų racionalumo įverčiai ir alternatyvių kombinacijų rangai (rikiavimas pagal svarbą) kiekvieno metodo atžvilgiu (2.5 lentelė). Pateiktas metodas gali būti naudojamas įvairių daugiapakopių, daugiakriterinių sprendimo priėmimo uždavinių sprendimui, kai informacija apie alternatyvas pateikta kiekybiniu pavidalu (2.18 pav.). Nagrinėjamu atveju *SyMAD-3* metodas taikomas atitvarinių konstrukcijų įrengimo sprendimų analizei ir sintezei.

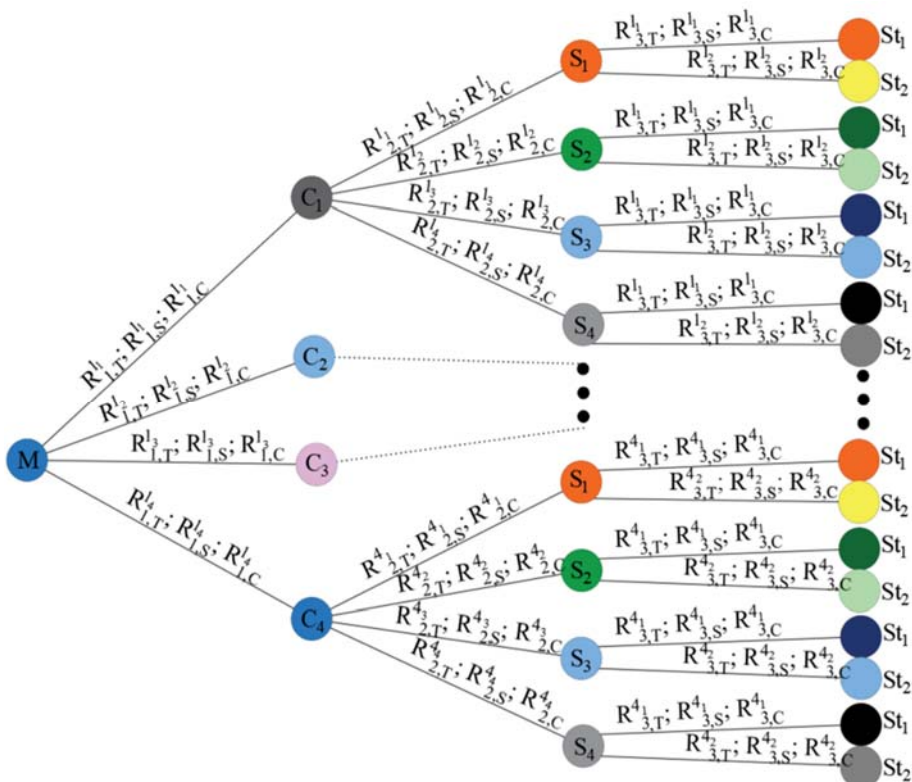
Šio metodo algoritme yra naudojami daugiakriterio sprendimo priėmimo COPRAS (Zavadskas, Kaklauskas 1996), TOPSIS (Hwang, Yoon 1981) ir SAW (MacCrimmon 1968^b) skaičiavimai.

COPRAS (Zavadskas *et al.* 2004; Kaklauskas *et al.* 2006) metodas nagrinėja prioritetiškumus ir reikšmingumus, kurie tiesiogiai priklauso nuo alternatyvas apibūdinančių rodiklių sistemos. Pradinius reikšmingumus apskaičiuoja ekspertai,

taid suinteresuoti asmenys (turto valdytojas, užsakovas ir pan.) informaciją gali koreguoti, atsižvelgdami į esamą padėtį bei siekiamus tikslus. Tokie alternatyvų įvertinimo rezultatai yra ekspertų ir suinteresuotų asmenų bendrai pateikti pradiniai duomenys. Šiuo metodu nustatomas prioritetiškumas taikant formulę:

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-min} \cdot \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-min} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{S_{-min}}{S_{-i}}}, i = \overline{1, m}, \quad (2.18)$$

čia S_{+i} apibūdina teigiamas reikšmes, o S_{-i} neigiamas savybes, nustatant lyginamųjų variantų santykinį reikšmingumą. Projekto efektyvumą apibūdina Q_i reikšmė, kuo ji didesnė tuo prioritetiškumas aukštesnis.



2.18 pav. Pastato modernizacijai skirtas sprendimo priėmimo medis, pritaikant 2.5 lentelės duomenis

Fig. 2.18. The decision tree for building modernization using the data from the Table 2.5

TOPSIS metodas apibrėžia variantų racionalumo nustatymą. Tai optimalios alternatyvos mažiausias atstumas nuo idealaus sprendimo ir didžiausias atstumas nuo blogiausio sprendimo (Hwang, Yoon 1981). Toks metodas yra vadinamas variantų racionalumo nustatymu artumo idealiajam taškui metodu (TOPSIS – *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). Kiekvieno i -ojo varianto santykinis atstumas iki idealaus yra nustatomas pagal šią formulę:

$$K_i = \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-}, i = \overline{1, m}, \text{ kai } K_i \in [0; 1], \quad (2.19)$$

čia L_i^+ – atstumas tarp lyginamojo i -ojo ir idealiai geriausio varianto; L_i^- – atstumas tarp lyginamojo i -ojo ir neigiamai idealaus varianto. K_i reikšmė kuo artimesnė vienetui, tuo i -tasis variantas artimesnis a^+ , t. y. racionalus variantas bus tas, kurio K_i reikšmė yra didžiausia.

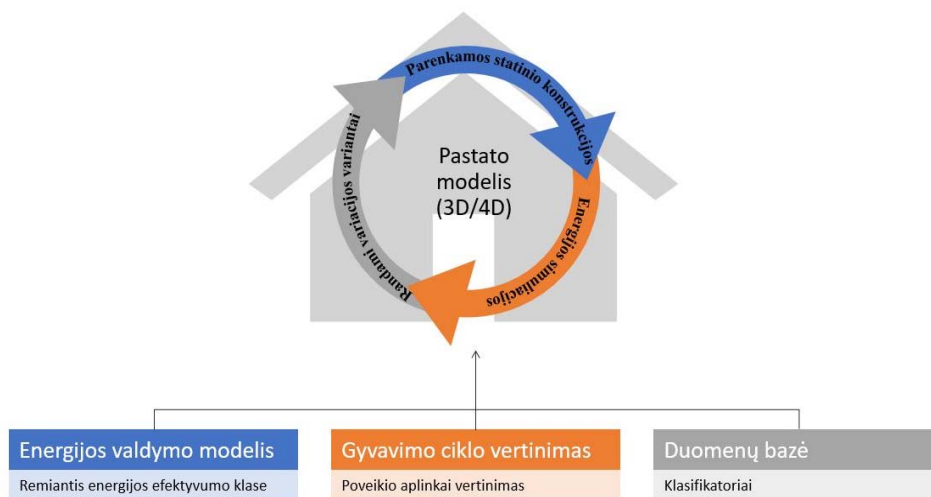
2.8. Esamų statinio informacinio modeliavimo technologijų pritaikymas visuomeninių pastatų modernizacijai

Ateities statyba yra siejama su skaitmenine technologija (Harris 2013) kuri padėtų išspręsti dideles išlaidas, statybos proceso terminų vykdymą, gyvavimo ciklo užtikrinimą ir projektavimo modelį, modernizuojant visuomeninius pastatus pasirinktomis alternatyvomis. Tai yra naujas pramonės terminas, nurodantis parametrinę 3D vizualizacijos technologiją ir pramonės procesą (Taylor, Bernstein 2009; Popov *et al.* 2010; Salman 2011). Skaitmeninio statinio galimybės apima jo gyvavimo ciklo fazes, integruoja programos valdiklius ir klasifikuoja informacijos valdymą standartizuotu būdu (Popov *et al.* 2011). Sukurtas tikrovės modelis yra skaitmeninis informacijos duomenų bazės modelis, kuriame saugomi visi architektūriniai projektai su geometrine informacija ir techninė dokumentacija (Ding *et al.* 2012).

Naujas metodas atliekant pastato modernizaciją, įtrauktas į BIM modelį, sukuria virtualią aplinką, kur taikant sprendimų priėmimo simuliacijas daug paprasčiau galima nustatyti tikėtino ir faktinio energijos vartojimo efektyvumą (2.18 pav.). Integruojant atskirų sistemų BIM modelius į vieną skaitmeninę erdvę, galima sukurti automatizuotą modernizacijos sintezės sistemą, kai ieškant tvarių sprendinių (Wong, Kuan 2014) taupomas laikas ir didinamas tikslumas.

Dažniausiai pastatyti realūs pastatai neatitinka siekiamos energijos klasės, net kai naudojami labai sudėtingi energijos modeliavimo metodai

(Menezes *et al.* 2012; Bordass *et al.* 2001; Sunikka-Blank, Galvin 2012; Majcen *et al.* 2013; Lin, Liu 2015). Paprastai konstrukciniai elementai ir inžinerinės sistemos vertinamos atskirai. Pastatas turėtų būti vertinamas kaip sudėtinga, dinamiška ir netiesinė sistema, kurioje parametrai keičiasi labai greitai ir priklauso nuo termodinaminės būsenos (Clarke 2013). Todėl būtina naudoti kompiuterines modeliavimo programas. Skaiciavimo metodų įtraukimas į architektūrą leidžia atlikti pirmio projektavimo etapo pastatų eksploatacijos analizę. Žiūrint į pastatą kaip į sistemą ir atskleidžiant sudėtingas priklausomybes, įmanomi nauji požiūriai, o siekiant ekonomiškai efektyvaus pastato būtina atlikti įvairių sričių simuliacijas dar pirminiame pastato projektavimo etape. Taikant pastato modelį BIM technologijos pagrindu, modernizacijos variantų analizė atliekama modeliavimo pagrindu kai: parenkama statinio konstrukcijos alternatyva, vėliau atliekamas šios konstrukcijos energinių savybių įvertinimas atliekant simuliacijas, jei atlikus šias simuliacijas parinktas konstrukcijos variantas netenkina siekiamos energinės klasės, renkamas naujas konstrukcijos variantas.



2.18 pav. 3D/4D modelio pritaikymas atliekant modernizaciją

Fig. 2.18. Application of 3D / 4D model during modernization process

Kita vertus, viena pagrindinių teorinių modelių ir realaus pastato eksploatacijos savybių neatitikimo priežasčių yra žmonių elgesys, darantis įtaką pastatų eksploatacijos savybėms (Martinaitis *et al.* 2015^b). Pastatų energetinėms ir šiluminėms savybėms įtakos turi ne tik šilumos ir vėdinimo šaltiniai, bet ir prietaisų eksploatavimas, manipuliavimas pastatų šildymo, vėdinimo ir apšvietimo valdymo sistemomis.

2.9. Antrojo skyriaus išvados

1. Sukurtas visuomeninių pastatų modernizacijos modelis, kuris apima skirtingus procesus: pastato auditą, trimačio skaitmeninio informacinio pastato modelio sukūrimą bei jo taikymą energinės simuliacijos procesuose. Tokiu būdu prieš atliekant projektavimo darbus galima parinkti optimalų energijos efektyvumo sprendimą.
2. Nustatyta, kad atliekant pastato auditą būtina atsižvelgti į: pastato architektūrinius sprendinius, įvertinti mikroklimato sąlygas patalpose bei nustatyti atitvarinių konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientus. Pastato būklės įvertinimas susideda iš atitvarinių konstrukcijų, vidinių pastato erdvių ir pastato inžinerinių sistemų būklės nustatymo.
3. Objektų modelių kūrimui fotogrammetrinio būdu naudojama įranga nėra brangi, todėl kuriami skaitmeniniai modeliai yra ekonomiškai efektyvesni nei kitais būdais kuriami modeliai.
4. Nustatyta, kad sukurtas trimatis fotogrammetrinis pastato modelis gali būti laikomas pradiniu pagrindu BIM technologijos taikymui. Fotogrammetrinio būdu sukurti trimačiai skaitmeniniai modeliai naudojami ne tik prieš atliekant projektavimo darbus, tačiau ir vykdant statybos darbų priežiūrą.
5. Sukurtas BIM technologija pagrįstas modelis, kurio pagrindas yra informacijos valdymas įvairiose modernizacijos proceso stadijose: nuo atliekamo pastato audito ir energetinės pastato klasės nustatymo iki MCDD metodu paremto optimalaus modernizacijos varianto parinkimo. Toks modelis mažina žmogiškųjų klaidų galimybes.
6. Nustatyta, kad atliekant modernizaciją, BIM technologijos taikymas yra reikalingas siekiant sumažinti CO₂ emisijos kiekius miestuose, nes naudojant šią technologiją galima parinkti efektyviausią pastato energetinį modelį. Šia technologija paremti projektavimo darbai leidžia numatyti aplinkai draugiškas ir ekologiškas priemones (medžiagas) pastato modernizacijai atlikti, nemažinant siekiamos pastato energetinės klasės.
7. Pritaikius atvirkštinio energijos vartojimo uždavinio modelį galima sumažinti alternatyvių modernizacijos variantų kiekį, todėl galima greičiau parinkti efektyviausią modernizacijos variantą.
8. Sukurtą optimizavimo modelio algoritmą siūloma išskaidyti į du etapus. Pirmuoju etapu vertinami pastato konstrukcijų bei inžinerinių sistemų reikšmingi rodikliai – maksimalus, minimalus, vidutinis ir reikšmingas

šilumos perdavimo koeficientas. Nustatomi galimi rodiklių variacijos intervalai ir pastato pagrindinių elementų (konstrukcijų ir sistemų) efektyviausi rodikliai. Antruoju etapu nustatomi šilumos parametrų skirtumai tarp gautų pirmojo etapo suskaičiuotų rezultatų ir siekiamų, įvertinus atvirkštinio energijos vartojimo uždavinio sąlygas. Iš gautų rezultatų parenkamos modernizacijos alternatyvos, atliekama alternatyvių kombinacijų įvertinimo analizė bei nustatomas atliktų analizių efektyvumas.

9. Atlikus analizę nustatyta, kad visuomeninių pastatų modernizacijos modelio kūrimui taikant BIM technologiją ir daugiapakopių variantų skaičiavimo metodus, padidėja pastatų modernizacijos kokybė, o gauti rezultatai atitinka Europos Sąjungos reikalavimus – ilgaamžio ir ekologiško pastato principus.

Sukurto modernizacijos modelio pritaikymas visuomeniniam pastatui

Šiame skyriuje nagrinėjamas realus pastatas, kurį reikia modernizuoti dėl nusidėvėjimo. Šiam pastatui pritaikytas visuomeninių pastatų modernizacijos variantų ir sprendimų efektyvumo vertinimas, kuris aprašytas 2.7 poskyryje. Pateikiami tiriamojo pastato nustatyti atitvarinių konstrukcijų pagrindiniai parametrai (žr. A priedą) ir įvertinamas jų nusidėvėjimas. Pastato inventorizacijos darbams palengvinti pasitelktas fotogrammetrinis 3D modelis, kuris buvo sukurtas iš kombinuotų būdu užfiksuotų nuotraukų (paprastu fotoaparatu ir dronu). Suformuoti elementų energetinės simuliacijos reikšmingi rodikliai. Nustatyti efektyviausių variacijos variantų rodikliai, pritaikant sprendimų priėmimo matricą ir normalizuojant matricos rodiklius.

Naudojamas optimizavimo modelis įvertinant pastato trūkstamų savybių skirtumus numatytoms konstrukcijoms modernizuoti.

Išnagrinėti galimi konstrukcijų modernizacijos variantai įvertinus: šilumos perdavimo koeficientą, modernizacijos kainą, prognozuojamos priemonės gyvavimo trukmę, statybos darbus neatsižvelgiant į sezoniskumą, konstrukcijos storį, nustatant metinį sutaupymo ir atsipirkimo laiką.

Siūloma modernizuoti naudojant skaičiavimais nustatytą geriausią alternatyvų kombinaciją. Gautus rezultatus projektuotojas gali pritaikyti formuodamas

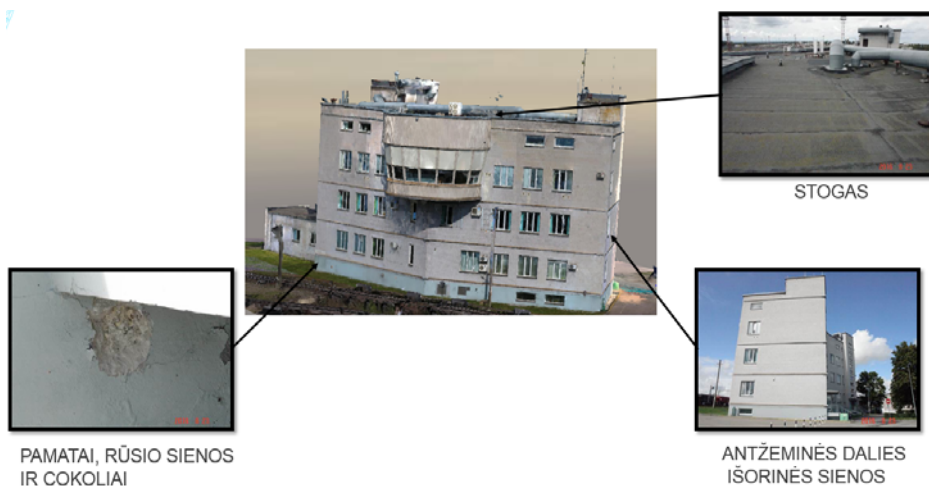
BIM modelį, integruodamas fotogrammetrinį modelį kartu su modernizacijos pasiūlytais variantais.

Skyriuje nagrinėjama tema autorė kartu su bendraautoriais paskelbė vienoje publikacijoje (Ustinovičius *et al.* 2018).

3.1. Tiriamojo visuomeninio pastato energijos vartojimo efektyvumo analizė ir modernizacijos sprendimo būdų parinkimas

Šiam modernizacijos modeliui patikrinti pasirinktas pastatas, kuriam buvo reikalinga modernizacija. Statinio pavadinimas – Radviliškio manevrinis dispečerinis postas (Bokšto g. 13). Šis statinys yra administracinės paskirties. Pagal projektavimo darbus šio pastato modernizavimas būtų priskirtas ypatingų statinių grupei (STR 1.01.03:2017 „Statinių klasifikavimas“). Esamas statinio bendras plotas: 1455,73m². Kadangi pastatas yra administracinės paskirties jam buvo numatyta atlikti tokius darbus: perplanuoti patalpas, suremontuoti vidaus patalpas, pagerinti energetinius rodiklius, apšiltinti pastatą iš išorės, pakeisti inžinerines šildymo ir vėdinimo sistemas. Nagrinėjamas 4 aukštų pastatas yra pastatytas iš silikatinių plytų mūro ir neapšiltintas. Vidaus apdaila morališkai ir techniškai nusidėvėjusi. Vidaus šildymo vėdinimo inžinerinės sistemos neatitinka keliamų reikalavimų. Pastatas pastatytas pagal buvusio instituto Želdorprojekt Vilniaus filialo 1971m. parengtą techninį darbo projektą ir, kaip galima buvo numanyti, jokios projektinės informacijos nėra. Paskutinis šio pastato remontas buvo atliktas 1998 metais.

Kadangi pastatas statytas seniai ir išlikusios informacijos apie medžiagas, naudotas pastato statybai, praktiškai nėra, reikėjo atlikti pastato inventorizaciją (auditą) ir nustatyti realią jo būklę. Esamo pastato duomenims surinkti galima naudoti lazerinius skaitytuvus, kurie turi termografines kameras ir tokiomis technologijomis informaciją galima rinkti ir apdoroti automatiškai, nustatant šiluminių tiltų vietas, konstrukcijų lūžius, ventiliacijos ir oro kondicionavimo ar šildymo sistemas. Šio pastato tyrimui panaudota kombinuota analizė – pastatas vertinimas vietoje ir iš sudaryto 3D fotogrammetrinio modelio sukurtas iš 1000 nuotraukų fotografuojant dronu. Buvo išanalizuota esama pastato situacija, energetinis pastato nuostolis cokoliuose, stoge ir išorinėse sienose (3.1 pav.). Sukurtas trimatis fotogrammetrinis pastato modelis gali būti laikomas pradinių duomenų pagrindu BIM technologijai. Fotogrammetrinio būdu sukurtas trimatis skaitmeninis modelis naudojamas atliekant projektavimo darbus.



3.1 pav. Fotogrammetrinio modelio tyrimas
Fig. 3.1. Investigation of photogrammetric model

Prieš atliekant pastato modernizacijos darbus būtina buvo nustatyti pastato izoliacines savybes – kurios pastato dalys yra izoliuotos, o kurios neizoliuotos. Gauti rezultatai parodo, kur būtina įrengti termoizoliaciją. Tiriant pastatą buvo nustatytas jo fizinis nusidėvėjimas prieš modernizacijos darbus. Pastato audito duomenys pateikti 3.1 lentelėje.

3.2. Atskirų pastato atitvarinių konstrukcijų analizė

Buvo atliktas atitvarinių konstrukcijų esamos būklės vertinimas. Nustatytas šių konstrukcijų fizinis nusidėvėjimas. Pastatų atitvarų (stogo, sienų, langų, cokolio) būklė vertinama vizualiai apžiūrint pastatą, atliekama objektų paviršių fotofiksacija. Rodiklių vertės yra pateiktos tyrimo A priede.


3.2.1. Išorinių atitvarinių konstrukcijų fizinės būklės vertinimas

Įvertinta Radviliškio manevrinio dispečerinio posto (Bokšto g. 13) pastato išorinių atitvarinių konstrukcijų fizinė būklė. Pastato konstrukcijos įvertinamos ir nustatomos didžiausią įtaką darančių konstrukcijų pažaidos (3.1 lentelė), pateikiamos rekomendacijos modernizacijos darbams atlikti.

3.1 lentelė. Pastato atitvarinių konstrukcijų analizė**Table 3.1.** Analysis of building partitions structures

Pastato konstrukcijos	Esama fizinė konstrukcijų būklė	Rekomendacijos
Pamatai, rūsio sienos ir cokoliai	<p>Juostiniai pamatai ir rūsio sienos. Jų fizinė būklė gera. Išorės cokolinės dalies apdailoje vietomis yra nežymių plyšių, kai kur trupa tinkas, prie nuogrindos ant cokolių veisiasi mikroorganizmai.</p>  	<p>Siūloma mechaniškai nuvalyti nuo cokolių bei atkastų rūsio sienų teršalus, nuplauti paviršius fungicidais, išlyginti pažeistus jų paviršius, po to išdžiovinti, pataisyti hidroizoliaciją ir papildomai apšiltinti iš išorės.</p>
Antžeminės dalies išorinės sienos	<p>Antžeminės dalies išorinės sienos yra sumūrytos iš 51 cm silikatinių plytų. Plytų būklė vietomis bloga, jos turi įtrūkių, į kuriuos gali skverbtis drėgmė bei teršalai. Fasadinio mūro siūlės jau nusidėvėjusios, iš jų vietomis iškritęs skiedinys. Į tokias siūles, o iš jų ir į plytas laisvai gali irgi skverbtis vanduo bei teršalai. Į sienas prasiskverbusi drėgmė su teršalais gali smarkiai didinti šilumos pralaidumą ir trumpinti eksploatacijos trukmę.</p>  	<p>Rekomenduojama nuo fasadų paviršiaus pašalinti teršalus – nuplauti fungicidais, išlyginti paviršius, po to išdžiovinti ir atlikti papildomą išorinį apšiltinimą su reikiama apdaila. Metalą, kuriuo buvo stiprintos išorinės sienos, rekomenduojama nuvalyti srautiniu būdu (pvz. smėliasraute) ir padengti antikorozinėmis dangomis pagal numatomą statinio eksploataavimo trukmę.</p>

3.1 lentelės pabaiga

Pastato konstrukcijos	Esama fizinė konstrukcijų būklė	Rekomendacijos
Stogas	<p>Stogo konstrukcija yra sutapdinta. Hidroizoliacijoje yra ventiliacijos kaminėliai ventiliuoti keramzitui, esančiam tarp hidroizoliacijos ir denginio plokštės. Dabartinis stogo storis apie 420 mm. Denginio plokštė gelžbetoninė kiaurymėta 220 mm aukščio, skaičiuojamoji apkrova 400 kg/m².</p> 	Rekomenduojama nuimti visus sluoksnius iki denginio plokštės ir įrengti stogą pagal pasirinktą mazgą.

3.2.2. Vidinių atitvarinių konstrukcijų fizinės būklės vertinimas

Kadangi architektūriniai sprendiniai turi didelę įtaką būsimoms pastato energijos sąnaudoms, būtina taip pat įvertinti ir Radviliškio manevrinio dispečerinio posto pastato vidinių atitvarinių konstrukcijų fizinės būklės.

Pastato konstrukcijos įvertinamos ir nustatomos didžiausią įtaką darančių konstrukcijų pažeidos (3.2 lentelė), pateikiamos rekomendacijos modernizacijos darbams atlikti. Tik atlikus vidinių atitvarinių konstrukcijų fizinę būklę galima nustatyti tikrąją pastato energetinę klasę. Gautus duomenis galima įvesti į jau sukurtą skaitmeninį 3D modelį.

Vertinant šiluminius vidinių atitvarinių konstrukcijų parametrus būtina atsižvelgti į konstrukcijų būklę, patalpų naudojimo intensyvumą, šildymo sezono ir įvertinti taršos šaltinius, kurie turi įtakos oro kokybei patalpose. Mikroklimato sąlygų užtikrinimas atliekant modernizavimo darbus yra labai svarbūs.

Temperatūriniai vidinių erdvių šilumos perdavimo koeficientai matuojami charakteringuose tiriamojo pastato taškuose.

3.2 lentelė. Vidinių atitvarinių konstrukcijų analizė**Table 3.2.** Analysis of internal partitions constructions

Pastato vidaus konstrukcijos	Esama fizinė konstrukcijų būklė	Rekomendacijos
Grindys/cokolis	<p>Visų aukštų grindys įrengtos virš perdangų, sumontuotų iš industrinių gelžbetoninių plokščių. Daroma prielaida, kad grindyse nėra tinkamos garso ir šilumos izoliacijos.</p> 	<p>Rekomenduojama visuose aukštuose nuimti grindų dangas ir jų pagrindus. Cokolinio aukšto grindyse įrengti naują šilumos izoliaciją, o kituose aukštuose garso izoliaciją ir visur naujas dangas.</p>
Vidaus sienos	<p>Vidaus sienos sumūrytos iš 120 – 380 mm storio plytų, iš abiejų pusių tinkuotos. Esminių pažeidimų nepastebėta. Būklė laikytina gera.</p>	
Perdangos	<p>Visų aukštų perdangos sumontuotos iš industrinių gelžbetoninių plokščių 220 mm storio. Apatinis plokščių paviršius – lubos nelygios, vietomis iš siūlių iškritęs glaistas. Kitokių gedimų nepastebėta. Būklė laikytina gera.</p> 	<p>Rekomenduojama lubas apdailinti apdailos priemonėmis (pvz. pakabinamomis lubomis). Virš 3 aukšto centrinės dalies yra metaliniais dvitėjais stiprintos lubos (stogo denginys), kurie šiuo metu pažeisti korozijos. Šiuos metalus rekomenduojama nuvalyti srautiniu būdu (pvz. smėliasraute) ir padengti antikorozinėmis dangomis pagal numatomą statinio eksploatavimo trukmę. Metalu darbus numatyti ir vykdyti pagal LST EN ISO 12944 standarto reikalavimus.</p>

3.2 lentelės pabaiga

Pastato vidaus konstrukcijos	Esama fizinė konstrukcijų būklė	Rekomendacijos
Laiptai	<p>Pastato vidaus laiptai sumontuoti iš industrinių gelžbetoninių laiptatakių ir laiptų aikštelių. Iš apačios nudažyti. Turėklai ir apsauginės tvorelės yra metalinės. Turėklai vietomis iškrypę, neestetiški.</p> 	Rekomenduojama pakeisti apsaugines tvoreles su turėklais.
Vidaus durys	<p>Durų fizinė būklė patenkinama, tačiau estetiškas vaizdas yra taisytinas.</p> 	Rekomenduojama senas duris pakeisti naujomis.

Tiriant pastato vidinių atitvarinių konstrukcijų būklę buvo įvertintos šios pastato dalys: grindys, vidaus sienos, pastato perdangos, laiptai ir vidaus durys. Šio pastato vidinių sienų būklė esminių gedimų neturėjo, tad nebūtina vertinti jų atliekant modernizavimo darbus. Išvardintoms vidinių atitvarinių konstrukcijų dalims būtina atlikti remontų darbus ar net pakeisti jas naujomis pvz. durys.

3.3. Pastato atitvarinių konstrukcijų bei inžinerinių sistemų pagrindinių rodiklių nustatymas (energijos simuliacija)

Atliekami skaičiavimai įvertinant medžiagos šilumos laidumo koeficientą U ($W/(m^2 \cdot K)$): cokolio (rūsio grindys), lauko sienų ir stogo konstrukcijoms. Skaičiavimo rezultatai pateikti 3.2, 3.3 ir 3.4 paveiksluose.

3 Rūsio grindys						
Assembly No. Building Assembly Description						
Heat Transfer Resistance [m^2K/W] interior R_{si} : 0.17						
exterior R_{se} : 0.17						
Area Section 1	λ [$W/(m \cdot K)$]	Area Section 2 (optional)	λ [$W/(m \cdot K)$]	Area Section 3 (optional)	λ [$W/(m \cdot K)$]	Total Width
1. Betoninės grindys	1.000					Thickness [mm]
2. Smėlis	0.800					120
3.						150
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2			Percentage of Sec. 3	Total
						27.0 cm
U-Value: 1.544 $W/(m^2 \cdot K)$						

3.2 pav. Rūsio cokolio šilumos perdavimo koeficientas U , $W/(m^2 \cdot K)$

Fig. 3.2. The basement floor heat transfer coefficient U , $W/(m^2 \cdot K)$

1 Lauko siena						
Assembly No. Building Assembly Description						
Heat Transfer Resistance [m^2K/W] interior R_{si} : 0.13						
exterior R_{se} : 0.04						
Area Section 1	λ [$W/(m \cdot K)$]	Area Section 2 (optional)	λ [$W/(m \cdot K)$]	Area Section 3 (optional)	λ [$W/(m \cdot K)$]	Total Width
1. Vidaus tinkas	0.350					Thickness [mm]
2. Silikatinės plytos	1.000					15
3.						510
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2			Percentage of Sec. 3	Total
						52.5 cm
U-Value: 1.383 $W/(m^2 \cdot K)$						

3.3 pav. Lauko sienų šilumos perdavimo koeficientas U , $W/(m^2 \cdot K)$

Fig. 3.3. The outdoor walls heat transfer coefficient U , $W/(m^2 \cdot K)$

2		Stogas			
Assembly No. Building Assembly Description					
Heat Transfer Resistance [m ² K/W]		interior R _{si} : 0.10			
		exterior R _{se} : 0.04			

Area Section 1	λ [W/(m·K)]	Area Section 2 (optional)	λ [W/(m·K)]	Area Section 3 (optional)	λ [W/(m·K)]	Total Width
1. Hidroizoliacinė danga	0.230					15
2. Keramzitas	0.280					150
3. Denginio plokštė	1.100					250
4. Vidaus apdaila						
5.						
6.						
7.						
8.						

Percentage of Sec. 2	Percentage of Sec. 3	Total
		41.5 cm

U-Value: 1.033 W/(m²K)

3.4 pav. Stogo šilumos perdavimo koeficientas U, W/(m²·K)Fig. 3.4. The roof heat transfer coefficient U, W/(m²·K)

Darbo pradžioje reikia nustatyti analizuojamojo pastato pagrindinius energetinius atitvarinių konstrukcijų bei inžinerinių sistemų parametrus. Tam tikslui pasiekti taikomas naujai sukurtas pastato energetinės klasės nustatymas (2.16 pav.).

Naudojant pastato fotogrammetrinį modelį ir patalpų inventORIZACIJOS planus, buvo nustatyti bendri pastato parametrai. Jie pateikti 3.3 lentelėje. Sukurtas fotogrammetrinis modelis palengvino pastato fasado skaičiavimo darbus, tiksliai įvertinti išorinių sienų, langų bei stogo parametrus.

3.3 lentelė. Nustatyti Radviliškio manevrinio dispečerinio posto (Bokšto g. 13) pastato pagrindiniai parametrai

Table 3.3. Basic parameters of Radviliškis maneuvering dispatcher post building (Boksto Str. 13) were determined

Konstrukcijos	Pastato fasadų plotai, m ²					
Fasadas (toliau – F)	F1	F1 ₁	F2	F2 ₁	F3	F4
F orientacija (pvz., Šiaurė / Rytai / Pietryčiai ...)	Šiaurė	Šiaurės rytai	Rytai	Pietryčiai	Pietvakariai	Vakariai
Sienos (be langų ir durų)	205,9	131,49	288,31	202,97	241,01	306,71
Rūsio sienos	16,52	12,49	22,46	20,02	26,06	29,31
Langai	13,6	73,09	50,37	17,81	63,2	62,41
Lauko durys	2,96	3,35	5,53	3,33	Nėra	Nėra

3.3 lentelės pabaiga

Konstrukcijos	Pastato fasadų plotai, m ²					
Fasadas (toliau – F)	F1	F1 ₁	F2	F2 ₁	F3	F4
F atitvarinių konstrukcijų plotų suma	238,98	220,42	366,67	244,13	330,27	398,43
Stoglangių plotas, m ²	Nėra					
Bendras stogo plotas, m ²	546,78					
Išorinių perdangų plotas, m ²	41,57					
Pirmo aukšto grindų plotas, m ²	80,67					
Rūsio grindų (cokolis) plotas, m ²	370,57					
Pagrindiniai langų plotas, m ²	280,48					
Lauko durų plotas, m ²	15,17					

3.3.1. Pastato elementų energijos simuliacijos formavimas

Nustatoma, kad projektuojamas pastatas priskiriamas prie viešosios paskirties pastatų. Nustatant pastatų (jų dalių) energetinio naudingumo klasę, atitvarinių konstrukcijų pagrindinės reikšmės turi atitikti šilumos perdavimo koeficiento U (C,B) ($W/(m^2 \cdot K)$) energinės B klasės vertes. Pagrindinių rodiklių reikšmės lygiai ir variacijos intervalai bei inžinerinės sistemos variacijos reikšmingi rodikliai pateikti 3.4 lentelėje. Atsinaujinančių energijos šaltinių reikšmingi rodikliai pateikti 3.5 lentelėje. Atitvarinių konstrukcijų bei inžinerinių sistemų pagrindinių rodiklių variacijos intervalai sudaryti remiantis formavimo taisyklėmis pateiktomis šios disertacijos 2.3 lentelėje. Nustatyti konstrukcijų bei inžinerinių sistemų variacijos intervalai, kurie atitinka užduotos pastato energetinio naudingumo klasei (3.6 lentelė). Ši sprendimų priėmimo matrica taikoma efektyviausiems pagrindinių atitvarinių konstrukcijų šilumos perdavimo bei inžinerinių sistemų naudingumo koeficientams nustatyti.

Pastato šildymo sistemai ir šilto vandens ruošimo sistemai pasirenkami šaltiniai – dujinis katilas, centrinis mazgas, atnaujinta elektros sistema. Pastato šaldymo sistemai pastate – kondicionieriai, šaldymo kamera. Taip nustatomi energetinio naudingumo koeficientai šildymo ir vėdinimo sistemoms įvertinti. Pradiniame etape skaičiavimai atlikti neįvertinus atsinaujinančios energijos šaltinių. Vartojami lentelėse šie sutrumpinimai: dujinis katilas – d.k.; boileris – b; kondicionieriai – K; stogas – St.; rūsio grindys (cokolis) – R.g.; pastato sienos – S; langai ir durys – L. d; vėdinimo sistema – V.s.; dujiniai katilai – D.k.; šilto vandens ruošimas – Š.v.r.; šaldymo sistemos – Š.s.; Energijos klasės grupė – E.k.g. Išsamūs lentelių skaičiavimai pateikti šio darbo prieduose (žr. A priedą).

3.4 lentelė. Viešosios paskirties pastatas. Pagrindinių rodiklių reikšmės lygiai ir variacijos intervalai

Table 3.4. Public building. Levels and ranges of significance for the key indicator's variant intervals

Konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientai	Koeficientų dydis			
	pradinis	maksimalus	minimalus	vidutinis
Stogo atitvarų šilumos perdavimo koeficientai U_{st}	0,2	0,15	0,25	0,05
Rūsio grindų atitvarų perdavimo koeficientai U_{gr}	0,3	0,25	0,35	0,05
Sienų atitvarų perdavimo koeficientai U_s	0,25	0,2	0,3	0,05
Langų ir durų atitvarų perdavimo koeficientai U_{lg}	1,6	1,2	2	0,4
Inžinerinės sistemos				
Naudingumo koeficientai	η_{re0}	η_{remax}	η_{remin}	$\Delta\eta_{re}$
Vėdinimo sistema	0,8	0,9	0,7	0,1

Tiriamąjo pastato vartojamas energijos šaltinis – vandens šildymo kolektorius. Remiantis siūlomu pastatų modernizavimo optimizavimo modeliu, įvertinami atitvarinių konstrukcijų ir inžinerinių sistemų reikšmingi rodikliai kurie pateikti 3.5 lentelėje (visus duomenis žr. A priede). Nustatytu variacijos intervalo pagrindu buvo gauti pagrindiniai rodikliai. Iš viso gauti 234 variantai.

3.5 lentelė. Atitvarinių konstrukcijų ir inžinerinių sistemų pagrindinių rodiklių (lemiančių į energetinio naudingumo klasę) reikšmės nustatytų variacijos intervalų pagrindu

Table 3.5. Main characteristics of retaining structures and engineering systems (influencing energy efficiency class) values based on defined intervals of variation

Eil.	Rodikliai (šilumos perdavimo koeficientai)					Inžinerinių sistemų apibrėžimai			Energijos sąnaudos		
Nr.	St.	R.g.	C. s.	S.	L.d.	V.s.	D.k.	Š.v.r.	Š.s.	E.k.g.	kWh/m2x metai
1	0,15	0,25	0,25	0,2	1,2	0,7	yra	d.k.	K	B	184,23
2	0,20	0,25	0,25	0,2	1,2	0,7	yra	d.k.	K	B	186,30
...											
234	0,25	0,3	0,25	0,3	2	0,9	yra	d.k.	K	B	215,5

3.3.2. Efektyviausių variacijos intervalų nustatymas

3.5 lentelės pagrindu formuojama sprendimų priėmimo matrica. Nustatomi galimi variacijos intervalai taikant SAW (angl. *Simple Additive Weighting*) metodą. Duomenys pateikiami 3.6 lentelėje (visus duomenis žr. A priede).

3.6 lentelė. Sprendimų priėmimo matrica

Table 3.6. Decision making matrix

Variacijos alternatyvos	Rodikliai (šilumos perdavimo koeficientai)						Prioritetų eilutė
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos kWh/m ² ×metai	
...							
96	0,25	0,35	0,25	1,2	0,8	193,99	8
...							
100	0,25	0,35	0,3	1,2	0,9	196,56	1
...							
105	0,25	0,35	0,3	1,2	0,8	199,22	7
...							
123	0,25	0,35	0,25	1,6	0,8	202,64	9
...							
132	0,25	0,35	0,3	1,6	0,8	208,1	6
...							
162	0,25	0,3	0,2	1,2	0,9	185,86	10
...							
174	0,25	0,35	0,25	1,2	0,9	191,38	2
...							
201	0,25	0,35	0,25	1,6	0,9	200,44	3
...							
210	0,25	0,35	0,3	1,6	0,9	208,64	4
...							
228	0,25	0,35	0,25	2	0,9	210,83	5
...							
Min. ar max. rodiklis	max.	max.	max.	max.	max.	min.	
Rodiklio geriausia reikšmė	0,25	0,35	0,30	2,00	0,90	179,94	

Įvertinus gautus duomenis, nustatomi 10 efektyviausių variantų kurie yra suskirstomi prioritetų eilutės tvarka. Kadangi atlikta sprendimų matrica negali turėti neskaitinių reikšmių, ji turi būti normalizuojama. Matricos normalizavimui taikomos 2.8 ir 2.9 formulės. Duomenys pateikiami 3.7 lentelėje (visus duomenis žr. A priede). Normalizuotos matricos to paties varianto kiekvienas narys dauginamas iš jo reikšmingumo ir sudedamas su kitais alternatyvos (eilutės) nariais. Gauta suma dalijama iš svorių sumos.

3.7 lentelė. Normalizuota sprendimų priėmimų matrica

Table 3.7. Normalized decision making matrix

Variacijos alternatyvos	Rodikliai					
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos kWh/m ² ×metai
1	0,600	0,714	0,667	0,600	0,778	0,977
2	0,800	0,714	0,667	0,600	0,778	0,966
...						
234	1,000	0,857	1,000	1,000	1,000	0,835
Min. ar max. rodiklis.	max.	max.	max.	max.	max.	min.
Rodiklių reikšmės, q_j	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,500

Alternatyvų racionalumui įvertinti skaičiavimams taikoma šiame darbe aprašyta 2.10 formulė. Iš gautų duomenų nustatoma svorinė reikšmių matrica 3.8 lentelė (visus duomenis žr. A priede). Gauti duomenis įvertinami skirstant į prioritetų eilutes, kur efektyviausi duomenys yra pirmoje prioritetų eilutės pozicijoje.

3.8 lentelė. Svorinė reikšmių matrica

Table 3.8. Weighted matrix of values

Variacijų alternatyvos	Rodikliai						Rodiklių verčių suma	Prioritetų eilutė
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos kWh/m ² ×metai		
...								
96	0,100	0,100	0,083	0,060	0,089	0,464	0,896	8
...								
100	0,100	0,100	0,100	0,060	0,100	0,458	0,918	1

3.8 lentelės pabaiga

Variacijų alternatyvos	Rodikliai						Rodiklių verčių suma	Prioritetų eilutė
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos kWh/m²×metai		
...								
105	0,100	0,100	0,100	0,060	0,089	0,452	0,901	7
...								
123	0,100	0,100	0,083	0,080	0,089	0,444	0,896	9
...								
132	0,100	0,100	0,100	0,080	0,089	0,432	0,901	6
...								
162	0,100	0,086	0,067	0,060	0,100	0,484	0,896	10
...								
174	0,100	0,100	0,083	0,060	0,100	0,470	0,913	2
...								
201	0,100	0,100	0,083	0,080	0,100	0,449	0,912	3
...								
210	0,100	0,100	0,100	0,080	0,100	0,431	0,911	4
...								
228	0,100	0,100	0,083	0,100	0,100	0,427	0,910	5
...								

Nustatomi tiriamo pastato pagrindinių elementų (konstrukcijų ir sistemų) efektyviausi rodikliai (3.9 lentelė). Palyginus variacijos variantus, nustatyti žemiau pateikti pagrindinių pastato elementų, lemiančių pastato energetinio naudingumo klasę, parametrai.

3.9 lentelė. Pastato efektyviausi rodiklių variantai pagrindinių elementų (konstrukcijų ir sistemų)

Table 3.9. Building's most effective indicator variants of key elements (structures and systems)

Variacijų alternatyvos	Rodikliai (šilumos perdavimo koeficientai)						Prioritetų eilutė
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos kWh/m ² ×metai	
100	0,25	0,35	0,3	1,2	0,9	196,56	1
105	0,25	0,35	0,3	1,2	0,8	199,22	4

3.9 lentelės pabaiga

Variacijos alternatyvos	Rodikliai (šilumos perdavimo koeficientai)						Prioritetų eilutė
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos kWh/m ² ×metai	
119	0,2	0,3	0,25	1,6	0,8	198,03	2
131	0,2	0,35	0,3	1,6	0,8	205,8	6
132	0,25	0,35	0,3	1,6	0,8	208,1	7
174	0,25	0,35	0,25	1,2	0,9	199,05	3
205	0,15	0,3	0,3	1,6	0,9	199,38	5
210	0,25	0,35	0,3	1,6	0,9	208,64	8

Iš gautų variacijos alternatyvų buvo nustatyti 8 efektyviausi rodikliai, kurie sudėlioti prioriteto tvarka (3.9 lentelė).

Remiantis siūlomu pastatų modernizavimo optimizavimo modeliu, gauti duomenys toliau bus taikomi, atliekant skaičiavimus.

3.4. Optimizavimo modelio kūrimas

3.4.1. Modernizacijos krypties apibrėžimas

Taikant pastatų modernizavimo optimizavimo modelį (2.16 pav.) antrajame etape nustatoma kokiomis priemonėmis (konstrukciniais sprendiniais) galima pasiekti apibrėžtą pirmajame modernizacijos įvertinimo etape. Nustatomi pastato šilumos parametrų skirtumai nuo gautų (atlikus pirmojo etapo skaičiavimus) ir turimų pasiekti konstrukcijų (3.11–3.17 lentelės). Šie skaičiavimai atlikti pagal efektyviausius variacijos intervalus pateiktus 3.9 lentelėje. Pagal efektyviausių variantų prioritetų eilutės išsidėstymą, buvo vertinami šie variantai, nr: 100, 105, 119, 131, 132, 174, 205 ir 210.

3.10 lentelė. Konstrukcijų ir inžinerinių sistemų trūkstamų savybių nustatymas, variantui Nr.100

Table 3.10. Identification of missing properties in structures and engineering systems, option No. 100

Variacijos intervalas	Rodikliai					
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos kWh/m ² ×metai
Nr. 100	0,15	0,3	0,3	1,2	0,8	192,59
Esama	1,03	1,54	1,38	2,5	0,0	413,6
Skirtumas	0,88	1,24	1,08	1,3	0,8	221,01

Langai:

1 variantas – šilumos perdavimo koeficientas $U-1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$; darbų kaina – 60 743 EUR; metinis sutaupymas $29,63 \text{ kWh/m}^2\text{/m}$; atsipirkimo trukmė 20 metų. Pagal gautus pradinius duomenis toliau atliekami skaičiavimai geriausiai modernizacijos alternatyvai nustatyti.

3.11 lentelė. Konstrukcijų ir inžinerinių sistemų trūkstamų savybių nustatymas, variantui Nr.105

Table 3.11. Identification of missing properties in structures and engineering systems, option No. 105

Variacijos intervalas	Rodikliai					
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos $\text{kWh/m}^2 \times \text{metai}$
Nr.105	0,25	0,35	0,3	1,2	0,8	199,22
Esama	1,03	1,54	1,38	2,5	0,0	413,6
Skirtumas	0,78	1,19	1,08	1,3	0,8	214,38

Langai:

1 variantas – šilumos perdavimo koeficientas $U-1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$; darbų kaina – 60 743 EUR; metinis sutaupymas $29,63 \text{ kWh/m}^2\text{/m}$; atsipirkimo trukmė 20 metų. Pagal gautus pradinius duomenis toliau atliekami skaičiavimai geriausiai modernizacijos alternatyvai nustatyti.

3.12 lentelė. Konstrukcijų ir inžinerinių sistemų trūkstamų savybių nustatymas, variantui Nr.119

Table 3.12. Identification of missing properties in structures and engineering systems, optinio No. 119

Variacijos intervalas	Rodikliai					
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos $\text{kWh/m}^2 \times \text{metai}$
Nr. 119	0,2	0,3	0,25	1,6	0,8	198,03
Esama	1,03	1,54	1,38	2,5	0,0	413,6
Skirtumas	0,83	1,24	1,13	0,9	0,8	215,57

Langai:

1 variantas – šilumos perdavimo koeficientas $U-1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$; darbų kaina – 48 740 EUR; metinis sutaupymas $26,56 \text{ kWh/m}^2\text{/m}$; atsipirkimo trukmė 18 metų. Pagal gautus pradinius duomenis toliau atliekami skaičiavimai geriausiai modernizacijos alternatyvai nustatyti.

3.13 lentelė. Konstrukcijų ir inžinerinių sistemų trūkstamų savybių nustatymas, variantui Nr.131

Table 3.13. Identification of missing properties in structures and engineering systems, option No. 131

Variacijos intervalas	Rodikliai					
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos kWh/m ² ×metai
Nr. 131	0,2	0,35	0,3	1.6	0.8	205.8
Esama	1,03	1,54	1,38	2.5	0	413.6
Skirtumas	0,83	1,19	1,08	0.9	0.8	207.8

Langai:

1 variantas – šilumos perdavimo koeficientas $U=1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$; darbų kaina – 48 740 EUR; metinis sutaupymas $26,56 \text{ kWh/m}^2/\text{m}$; atsipirkimo trukmė 18 metų. Pagal gautus pradinius duomenis toliau atliekami skaičiavimai geriausiai modernizacijos alternatyvai nustatyti.

3.14 lentelė. Konstrukcijų ir inžinerinių sistemų trūkstamų savybių nustatymas, variantui Nr.132

Table 3.14. Identification of missing properties in structures and engineering systems, option No. 132

Variacijos intervalas	Rodikliai					
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos kWh/m ² ×metai
Nr. 132	0,25	0,35	0,3	1,6	0,8	208,1
Esama	1,03	1,54	1,38	2,5	0	413,6
Skirtumas	0,78	1,19	1,08	0,9	0,8	205,5

Langai:

1 variantas – šilumos perdavimo koeficientas $U=1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$; darbų kaina – 48 740 EUR; metinis sutaupymas $26,56 \text{ kWh/m}^2/\text{m}$; atsipirkimo trukmė 18 metų. Pagal gautus pradinius duomenis toliau atliekami skaičiavimai geriausiai modernizacijos alternatyvai nustatyti.

3.15 lentelė. Konstruktijų ir inžinerinių sistemų trūkstamų savybių nustatymas, variantui Nr.174

Table 3.15. Identification of missing properties in structures and engineering systems, option No. 174

Variacijos intervalas	Rodikliai					
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos kWh/m ² ×metai
Nr. 174	0,25	0,35	0,25	1,2	0,9	191,38
Esama	1,03	1,54	1,38	2,5	0	413,6
Skirtumas	0,78	1,19	1,13	1,3	0,9	222,22

Langai:

1 variantas – šilumos perdavimo koeficientas $U=1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$; darbų kaina – 60 743 EUR; metinis sutaupymas 29,63 kWh/m²/m; atsipirkimo trukmė 20 metų. Pagal gautus pradinius duomenis toliau atliekami skaičiavimai geriausiai modernizacijos alternatyvai nustatyti.

3.16 lentelė. Konstruktijų ir inžinerinių sistemų trūkstamų savybių nustatymas, variantui nr. 205

Table 3.16. Identification of missing properties in structures and engineering systems, option no. 205

Variacijos intervalas	Rodikliai					
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos kWh/m ² ×metai
Nr. 205	0,15	0,3	0,3	1,6	0,9	199,38
Esama	1,03	1,54	1,38	2,5	0	413,6
Skirtumas	0,88	1,24	1,08	0,9	0,9	214,22

Langai:

1 variantas – šilumos perdavimo koeficientas $U=1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$; darbų kaina – 48 740 EUR; metiniai sutaupymai 26,56 kWh/m²/metai; atsipirkimo trukmė 18 metų. Pagal gautus pradinius duomenis toliau atliekami skaičiavimai geriausiai modernizacijos alternatyvai nustatyti.

3.17 lentelė. Konstrukcijų ir inžinerinių sistemų trūkstamų savybių nustatymas, variantui Nr. 210

Table 3.17. Identification of missing properties in structures and engineering systems, option No. 210

Variacijos intervalas	Rodikliai					
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos kWh/m ² ×metai
Nr. 210	0,25	0,35	0,3	1,6	0,9	208,64
Esama	1,03	1,54	1,38	2,5	0	413,6
Skirtumas	0,78	1,19	1,08	0,9	0,9	204,96

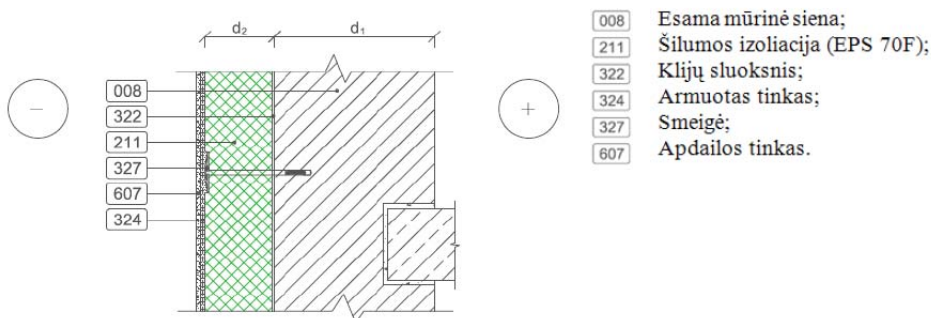
Langai:

1 variantas – šilumos perdavimo koeficientas $U=1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$; darbų kaina – 48 740 EUR; metinis sutaupymas 26,56 kWh/m²/m; atsipirkimo trukmė 18 metų. Pagal gautus pradinis duomenis toliau atliekami skaičiavimai geriausiai modernizacijos alternatyvai nustatyti.

Minėto Radviliškio pastato modernizacijos uždaviniui išspręsti, pirmiausiai parenkamos alternatyvos, iš kurių bus renkamos geriausios modernizacijos alternatyvos. Nagrinėjamos šios pastato dalys: cokolinė dalis, išorinės sienos, stogas. Siekiami konstrukcijos šilumos laidumo U (variantas 100) rodikliai:

- Sienoms $U = 0,3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$;
- Stogui $U = 0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$;
- Cokoliui $U = 0,25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$;
- Langams $U = 1,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Nagrinėjamos keturios sienų modernizacijos alternatyvos: Siena 1, Siena 2, Siena 3, Siena 4.

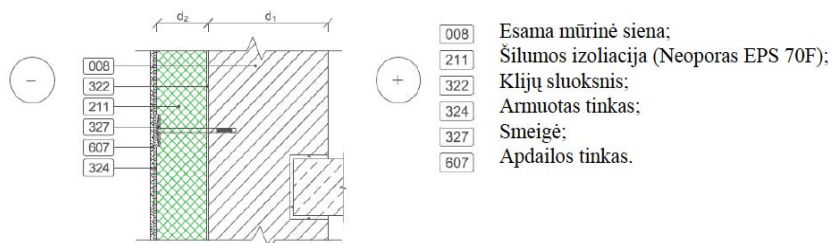


3.5 pav. Pirmosios sienos konstrukcijos detalė (Ignatavičius, Skrodenis 2011)

Fig. 3.5. Construction detail of the first wall (Ignatavičius, Skrodenis 2011)

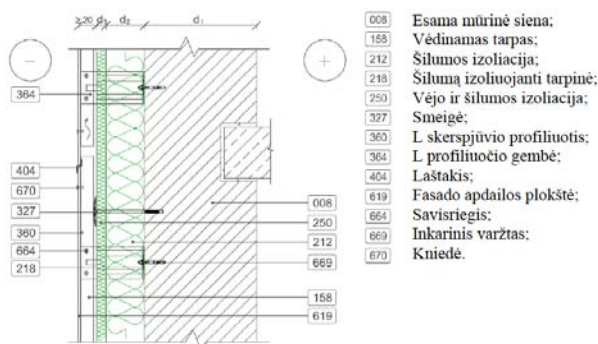
Siena 1 alternatyva – tai esama silikatinių plytų siena, kurios storis yra $d_1 = 510$ mm, apšiltinama trūkstamo (3.9 lentelė) storio polistireno putplasčiu EPS 70F. Pritvirtinus putplastį klėjais, klojamas armavimo tinklelis o sienos yra tinkuojamos plonasluoksniu tinku. Visa tai pavaizduota 3.5 pav.

Siena 2 alternatyva – tai esama silikatinių plytų siena, kurios storis yra $d_1 = 510$ mm, apšiltinama trūkstamu (lentelė 3.9) storio polistireno putplasčiu EPS 70F (neoporas). Pritvirtinus putplastį klėjais, klojamas armavimo tinklelis o sienos yra tinkuojamos plonasluoksniu tinku. Visa tai pavaizduota 3.6 pav.



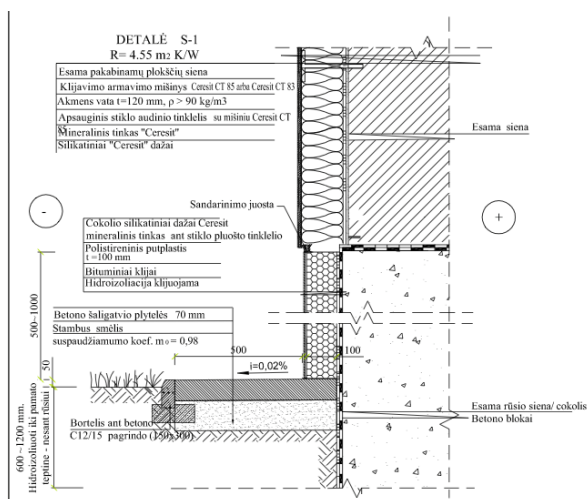
3.6 pav. Antrosios sienos konstrukcijos detalė (Ignatavičius, Skrodenis 2011)
Fig. 3.6. Construction detail of the second wall (Ignatavičius, Skrodenis 2011)

Siena 3 alternatyva – tai esama silikatinių plytų siena, kurios storis yra $d_1 = 510$ mm, apšiltinama trūkstamo (lentelė 3.9) storio akmens vata, $d_3 = 25$ mm storio akmens nuo vėjo vata, tuomet paliekamas 20 mm ventiliacinis oro tarpas ir klojama 10 mm fasadinė plokštė (HPL plokštė). Visa tai pavaizduota 3.7 pav.



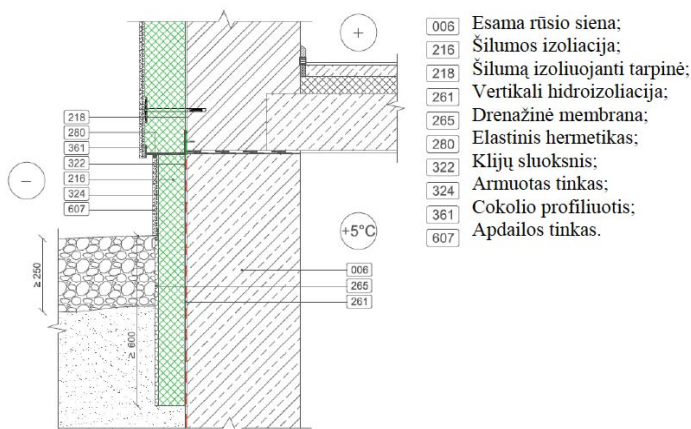
3.7 pav. Trečiosios sienos konstrukcijos detalė (Ignatavičius, Skrodenis 2011)
Fig. 3.7. Construction detail of the third wall (Ignatavičius, Skrodenis 2011)

Siena 4 alternatyva – tai esama silikatinių plytų siena, kurios storis yra $d_1 = 510$ mm, apšiltinama trūkstamo (lentelė 3.9) storio akmens vata. Atlikus akmens vatos pritvirtinimą klijais ir smeigėmis, klojamas armavimo tinklas o sienos yra tinkuojamos plonasluoksniu tinku. Visa tai pavaizduota 3.8 pav.



3.8 pav. Ketvirtosios sienos konstrukcijos detalė (Ignatavičius, Skrodenis 2011)

Fig. 3.8. Construction detail of the fourth wall (Ignatavičius, Skrodenis 2011)

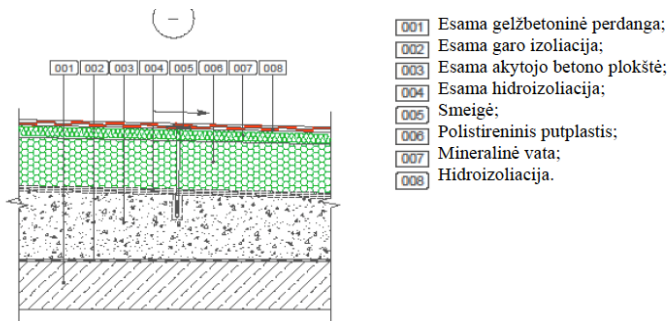


3.9 pav. Cokolio konstrukcijos detalė (Ignatavičius, Skrodenis 2011)

Figure 3.9. Construction detail of the plinth (Ignatavičius, Skrodenis 2011)

Analizuojamos keturios skirtingos cokolio (3.9 pav.) modernizacijos alternatyvos:

- Cokolis 1 alternatyva – tai esami gelžbetoniniai blokai, 400 mm storiu, apšiltinami polistireno putplasčiu EPS 100 ir trūkstamu storio sluoksniu (3.9 lentelė). Įrengiama nuogrinda aplink pastatą. Visa tai pavaizduota 3.9 paveiksle.
- Cokolis 2 alternatyva – tai esami gelžbetoniniai blokai, 400 mm storiu, apšiltinami putplasčiu EPS 100 ir trūkstamu storio sluoksniu (3.9 lentelė), nutinkuojamas hidroizoliaciniu tinku ir įrengiama nuogrinda aplink pastatą.
- Cokolis 3 alternatyva – tai esami gelžbetoniniai blokai, kurių storis yra 400 mm, apšiltinami iki trūkstamo (3.9 lentelė) storio polistireno putplasčiu EPS 100. Virš žemės paviršiaus esantis putplastis, uždengiamas apdailine plokšte, o po žeme – gumbuota membrana. Tai atlikus įrengiama nuogrinda aplink pastatą.
- Cokolis 4 alternatyva – tai esami gelžbetoniniai blokai, 400 mm storiu, apšiltinami trūkstamo (3.9 lentelė) storio polistireno putplasčiu EPS 100. Virš žemės paviršiaus esantis putplastis, uždengiamas plonasluoksniu tinku, o po žeme – gumbuota membrana. Įrengiama nauja nuogrinda aplink pastatą. Šis variantas taikomas, kai yra nepakankama rūsio perdanga. Įgilinamos ir priklijuojamos šilumos izoliacijos plokštės žemiau nuogrindos paviršiaus ≥ 600 mm. Drenažine membrana yra dengiama šilumos izoliacija, nuo nuogrindos paviršiaus iki apačios. Cokolio membranos apsauginiam elementui įrengiama drenuojama ir vėdinama nuogrinda.



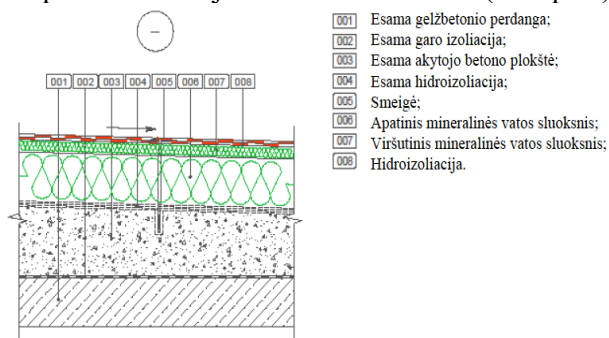
3.10 pav. Pirmosios stogo alternatyvos detalė (Ignatavičius, Skrodenis 2011)

Fig. 3.10. Detail of the first roof alternative (Ignatavičius, Skrodenis 2011)

Stogas 1 alternatyva – nuo stogo pašalinama sena ruloninė danga ir sutvarkomos šilumos izoliacijos medžiagos. Paklojamas trūkstamo (3.9 lentelė) storio apatinis apšiltinamas polistireno putplasčio EPS 80 sluoksniu. Tuomet

klojama 30 mm storio viršutinė kieta mineralinės vatos ROS 30 plokštė ir prilydoma dvisluoksnė ruloninė hidroizoliacijos danga. Atliekant darbus apskardinami parapetai ir izoliuojami vėdinimo kanalai (3.10 pav.).

Stogas 2 alternatyva – nuo stogo pašalinama sena ruloninė danga ir sutvarkomos senos šilumos izoliacijos medžiagos. Paklojama trūkstamo (3.9 lentelė) storio apatinė apšiltinama mineralinės vatos ROS 30 plokštė. Paklojama 30 mm storio viršutinė kieta mineralinės vatos ROS 50 plokštė ir prilydoma dvisluoksnė ruloninė hidroizoliacijos danga. Atliekant darbus apskardinami parapetai ir izoliuojami vėdinimo kanalai (3.11 pav.).



3.11 pav. Antrosios stogo alternatyvos detalė (Ignatavičius, Skrodenis 2011)

Fig. 3.11. Detail of the second roof alternative (Ignatavičius, Skrodenis 2011)

Parinktus visas modernizacijos alternatyvas, toliau nagrinėjami skaičiais reikalingi rodikliai.

3.4.2. Parinktų rodiklių sąrašo nustatymas

Nagrinėjant Radviliškio manevrinio dispečerinio posto (Bokšto g. 13) coklinę dalį, vartojami šie rodikliai:

- šilumos perdavimo koeficientas U , W/m^2K ;
- modernizacijos kaina, Eur;
- prognozuojama priemonės gyvavimo trukmė, m.;
- galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniskumą, balais;
- metinis sutaupymas, $kWh/m^2/m$;
- atsipirkimo trukmė, m.;
- konstrukcijos storis, mm.

Nagrinėjant minėto pastato išorines sienas, parenkami tokie rodikliai:

- šilumos perdavimo koeficientas U , W/m^2K ;
- modernizacijos kaina, Eur;

- prognozuojama priemonės gyvavimo trukmė, m.;
- galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniskumą, balais;
- metinis sutaupymas, kWh/m²/m.;
- atsipirkimo trukmė, m.;
- konstrukcijos storis, mm.

Nagrinėjant šio pastato stogą, parenkami tokie rodikliai:

- šilumos perdavimo koeficientas U , W/m²K.;
- prognozuojama priemonės gyvavimo trukmė, m.;
- modernizavimo kaina, Eur;
- galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniskumą, balais;
- atsipirkimo trukmė, m.;
- metinis sutaupymas, kWh/m²/m.;
- konstrukcijos storis, mm.

3.4.3. Konstrukcijų modernizacijos variantų analizė

Konstrukcijų modernizacijos variantų analizė atlikta atskirai kiekvienam energijos simuliacijos variantui (visų variantų skaičiavimai pateikti šios disertacijos A prieduose). Pateikti cokolio (grindų), sienų ir stogo modernizacijos variantai 3.18–3.20 lentelėse.

Konstrukcijų modernizacijos variantų analizė atlikta remiantis 3.9 lentele.

3.18 lentelė. Cokolio modernizacijos variantai

Table 3.18. Options for modernizing the plinth

Cokolio modernizacijos alternatyvos	Cokolio modernizacijos rodikliai						
	Šilumos perdavimo koeficientas U , W/m ² K	Modernizacijos kaina, Eur.	Prognozuojama priemonės gyvavimo trukmė, m.	Galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniskumą, balais	Metinis sutaupymas, kWh/m ² /m.	Atsipirkimo trukmė, m.	Konstrukcijos storis, mm
Cokolis 1 šiltinamas 800 mm gylio ir 130 mm storio polistireno putplasčiu EPS 100, apdaila plytelėmis. Naujai įrengiama nuogrinda aplink pastatą	0,25	43354	30	2	2,91	144	610

3.18 lentelės pabaiga

Cokolio modernizacijos alternatyvos	Cokolio modernizacijos rodikliai						
	Šilumos perdavimo koeficientas $U, \text{W/m}^2\text{K}$	Modernizacijos kaina, Eur.	Prognozuojama priemonės gyvavimo trukmė, m.	Galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniskumą, balais	Metinis sutaupymas, $\text{kWh/m}^2\text{m}$.	Atsipirkimo trukmė, m.	Konstrukcijos storis, mm
Cokolis 2 šiltinamas 800 mm gylio ir 130 mm storio polistireno putplasčiu EPS 100, putplastis nutinkuojamas hidroizoliaciniu tinku. Naujai įrengiama nuogrinda.	0,25	33694	25	2	2,91	112	610
Cokolis 3 šiltinamas 800 mm gylio ir 130 mm storio polistireno putplasčiu EPS 100 įleidžiant 600 mm į gruntą. Putplastis, esantis virš žemės, uždengiamas apdailine plošte, o esantis po žeme uždengiamas gumbuota membrana. Naujai įrengiama nuogrinda.	0,25	43876	27	6	2,91	146	610
Cokolis 4 šiltinamas 600 mm gylio ir 130 mm storio ekstrudiniu polistireno putplasčiu EPS 80. Putplastis, esantis virš žemės, apdailinamas plonasluoksniu tinku, o esantis po žeme uždengiamas gumbuota membrana. Naujai įrengiama nuogrinda.	0,25	34209	25	2	2,91	114	610
Minimizuojamas/ maksimizuojamas	min	min	max	max	max	min	max
Rodiklio reikšmė q	0,121	0,254	0,151	0,0461	0,173	0,175	0,0804

3.19 lentelė. Sienų modernizacijos variantai
Table 3.19. Options for modernizing the walls

Sienų modernizacijos alternatyvos	Sienų modernizacijos rodikliai						
	Šilumos perdavimo koeficientas U , W/m^2K	Modernizacijos kaina, Eur.	Prognozuojama priemonės gyvavimo trukmė, m.	Galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniskumą, balais	Metinis sutaupymas, $kWh/m^2/m$.	Atsipirkimo trukmė, m.	Konstrukcijos storis, mm
Siena 1 šiltinama 100 mm storio polistireno putplasčiu EPS 70F ir tinkuojama plonasluoksniu tinku.	0,3	81377	25	3	118	7	600
Siena 2 šiltinama 90 mm storio polistireno putplasčiu EPS 70F ir tinkuojama plonasluoksniu tinku.	0,3	82253	26	4	118	7	590
Siena 3 šiltinama akmens vata 70 mm, akmens nuo vėjo vata 25 mm, paliekamas ventiliacinis tarpas 20 mm, tvirtinama fasadinė plokštė 10 mm.	0,3	121754	27	6	118	10	635
Siena 4 šiltinama 100 mm storio akmens vata. Akmens vata pritvirtinama kliais ir smeigėmis. Tuomet klojamas armavimo tinklis ir siena tinkuojama plonasluoksniu tinku.	0,3	84284	25	3	118	7	600
Minimizuojamas/ maksimizuojamas	min	min	max	max	max	min	max
Rodiklio reikšmė q	0,140	0,245	0,136	0,0468	0,162	0,172	0,0976

3.20 lentelė. Stogo modernizacijos variantai
Table 3.20. Options for modernizing the roof

Stogo modernizacijos alternatyvos	Stogo modernizacijos rodikliai						
	Šilumos perdavimo koeficientas U , W/m^2K	Modernizacijos kaina, Eur.	Prognuzuojama priemonės gyvavimo trukmė, m.	Galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniškumą, balais	Metinis sutaupymas, $kWh/m^2/m$.	Atsipirkimo trukmė, m.	Konstrukcijos storis, mm
Stogas 1 pašalinama sena ruloninė danga ir sutvarkomos šilumos izoliacijos medžiagos. Paklojamas 210 mm storio apatinis polistireno putplasčio EPS 80 sluoksniis. Paklojama 30 mm storio viršutinė kieta mineralinės vatos ROS 30 plokštė ir prilydoma dvisluoksniė ruloninė hidroizoliacijos danga. Apskardinami parapetai, izoliuojami vėdinimo kanalai.	0,15	40539	25	6	35,51	11	460
Stogas 2 pašalinama sena ruloninė danga ir sutvarkomos šilumą izoliuojančios medžiagos. Paklojama 210 mm apatinė mineralinės vatos ROS 30 plokštė. Paklojama 30 mm storio viršutinė kieta mineralinės vatos ROS 50 plokštė ir prilydoma 2-jų sluoksnių ruloninė hidroizoliacijos danga. Apskardinami parapetai, izoliuojami vėdinimo kanalai	0,15	46803	25	4	35,51	13	460
Minimizuojamas/ maksimizuojamas	min	min	max	max	max	min	max
Rodiklio reikšmės q	0,136	0,260	0,132	0,0485	0,155	0,216	0,052

Langai:

1 variantas – šilumos perdavimo koeficientas $U-1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$; darbų kaina – 60 743 EUR; metinis sutaupymas 29,63 kWh/m²/m; atsipirkimo trukmė 20 metų.

Atliekamas atskirų dalių vertinimas cokolio (3.21 lentelė), sienų (3.22 lentelė) ir stogų (3.23 lentelė).

3.21 lentelė. Cokolio modernizacijos variantų rezultatai remiantis TOPSIS, SAW ir COPRAS metodais

Table 3.21. Results of plinths modernization variants using TOPSIS, SAW and COPRAS methods

Metodas Alternatyva	TOPSIS	SAW	COPRAS
Cokolis 1	0,2346	0,874	0,11337
Cokolis 2	0,572	0,945	0,106314
Cokolis 3	0,3982	0,886	0,124503
Cokolis 4	0,5579	0,938	0,106314

3.22 lentelė. Sienų modernizacijos variantų rezultatai remiantis TOPSIS, SAW ir COPRAS metodais

Table 3.22. Results of walls modernization variants using TOPSIS, SAW and COPRAS methods

Metodas Alternatyva	TOPSIS	SAW	COPRAS
Siena 1	0,7769	0,961	0,106433
Siena 2	0,8353	0,969	0,110276
Siena 3	0,2245	0,867	0,119258
Siena 4	0,7637	0,952	0,106433

3.23 lentelė. Stogo modernizacijos variantų rezultatai remiantis TOPSIS, SAW ir COPRAS metodais

Table 3.23. Results of roof modernization variants using TOPSIS, SAW and COPRAS methods

Metodas Alternatyva	TOPSIS	SAW	COPRAS
Stogas 1	1	1	0,1986
Stogas 2	0	0,915	0,1889

Ištyrus atskirų pastato alternatyvų dalis (cokolis, sienos, stogas), įvertinamos visos įmanomos kombinacijos modernizacijos sprendimo priėmimo medžiu (2.18 pav.). Pastato modernizacijos sprendimo priėmimui buvo parinkti 4

cokolio variantai, 4 sienų variantai ir 2 stogo variantai. Iš visų sudarytų variantų gautos 32 galimybės atlikti modernizacijos vertinimo procesus. Įvertinama SMAD-3 metodų kompleksu. Gautos alternatyvų kombinacijos pateiktos 3.24 ir 3.25 lentelėse.

3.24 lentelė. Alternatyvų kombinacijos sudarytos iš TOPSIS, SAW ir COPRAS metodais gautų įverčių

Table 3.24. Alternative combinations consist of estimates derived by the TOPSIS, SAW, and COPRAS methods

	Cokolis			Siena			Stogas		
	TOPSIS	SAW	COPRAS	TOPSIS	SAW	COPRAS	TOPSIS	SAW	COPRAS
B1	0,2346	0,874	0,11337	0,7769	0,961	0,106433	1	1	0,1986
B2	0,2346	0,874	0,11337	0,7769	0,961	0,106433	0	0,915	0,1889
B3	0,2346	0,874	0,11337	0,8353	0,969	0,110276	1	1	0,1986
...									
B31	0,5579	0,938	0,10631	0,7637	0,952	0,106433	1	1	0,1986
B32	0,5579	0,938	0,10631	0,7637	0,952	0,106433	0	0,915	0,1889

3.25 lentelė. Alternatyvų kombinacijų rezultatai remiantis TOPSIS, SAW ir COPRAS metodais

Table 3.25. Results of alternative combinations using TOPSIS, SAW and COPRAS methods

Alternatyvų kombinacijos	TOPSIS	SAW	COPRAS
B1	0,6832	0,252	0,009522
B2	0,3332	0,216	0,007434
...			
B31	0,8863	0,269	0,010217
B32	0,4227	0,234	0,008128

Atliekamas alternatyvių kombinacijų rangavimą taikant TOPSIS, SAW ir COPRAS metodus, rezultatai pateikiami 3.26 lentelėje (visi skaičiavimai yra pateikti A priede).

Remiantis sprendimo priėmimo medžiu, atliktas visų įmanomų alternatyvių modernizacijos kombinacijų įvertinimas. Šios kombinacijos buvo sudarytos remiantis TOPSIS, SAW ir COPRAS metodais

3.26 lentelė. Alternatyvų kombinacijų rangai remiantis TOPSIS, SAW ir COPRAS metodais

Table 3.26. Ranking of alternative combinations based on TOPSIS, SAW and COPRAS method results

Alternatyvų kombinacijos	Cokolis	Siena	Stogas	TOPSIS	SAW	COPRAS
B1	Cokolis 1	Siena 1	Stogas 1	11	11	11
B2	Cokolis 1	Siena 1	Stogas 2	27	27	27
B11	Cokolis 2	Siena 2	Stogas 1	1	1	1
.....						
B32	Cokolis 4	Siena 4	Stogas 2	22	21	22

Iš visų gautų 32 variantų, nustatyta jog efektyviausia alternatyvos kombinacija pagal visus tris metodus yra B11 variantas.

3.5. Atliktų analizių lyginimas ir efektyvumo nustatymas

Taikant 2.7 poskyriuje aprašytą optimizavimo modelio algoritmą, skaičiavimo darbai atliekami dviem etapais. Pirmu etapu nustatomi pagrindinių elementų rodikliai, o antru etapu iš gautų I etapo rezultatų nustatomi energetinę klasę atitinkantys alternatyvų sprendiniai. Šiame skyriuje nustatyti racionaliausi variantai (3.28–3.29 lentelės).

Energetinės variacijos, nr. 174 (3.16 lentelė) numatoma langų konstrukcija: 1 variantas – šilumos perdavimo koeficientas $U-1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$; darbų kaina – 60 743 EUR; metinis sutaupymas $29,63 \text{ kWh/m}^2\text{m}$; atsipirkimo trukmė 20 metų. Pagal lentelės pradinius duomenis toliau atliekami skaičiavimai geriausiai modernizacijos alternatyvai nustatyti.

Taip pat nustatyta, kad racionaliausias energetinis variantas yra Nr. 132 (3.27 lentelė).

Numatomi langai:

1 variantas – šilumos perdavimo koeficientas $U-1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$; darbų kaina – 48 740 EUR; metinis sutaupymas $26,56 \text{ kWh/m}^2\text{m}$; atsipirkimo trukmė 18 metų. Pagal lentelės pradinius duomenis atliekami skaičiavimai geriausiai modernizacijos alternatyvai nustatyti.

3.27 lentelė. Konstrukcijų ir inžinerinių sistemų trūkstamų savybių nustatymas**Table 3.27.** Identification of missing properties in structures and engineering systems

Variacijos intervalas	Rodikliai					
	St.	R.g.	S.	L.d.	V.s.	Energ. sąnaudos kWh/m ² ×metai
Nr. 132	0,25	0,35	0,30	1,6	0,8	208,1
Esama	1,03	1,54	1,38	2,5	0	413,6
Skirtumas	0,78	1,19	1,08	0,9	0,8	205,5

Pageidaujama Siena 3 užima 13 vietą iš 32 galimų. Visi skaičiavimų duomenys pateikti A priede.

Turint elektrinę vėdinimo sistemą su galimybe atjungti siūlomas variantas Nr.119 (3.13 lentelė) su nurodytais atsinaujinančios energijos šaltiniais (3.28 lentelė). Visi skaičiavimai Nr. 119 varianto pateikti A priede.

3.28 lentelė. Atsinaujinačios energijos šaltiniai**Table 3.28.** Renewable energy sources

Vandens šildymo kolektoriai	Efetyvumo plotas A	Tipas	Orientacija	kampas nuo horizontalios plokštumos
	1,82 m ²	Plokščiasis su grūdintu stiklu	Pietvakariai	45°

Numatomi langai:

1 variantas – šilumos perdavimo koeficientas $U=1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$; darbų kaina – 60 743 EUR; metinis sutaupymas $29,63 \text{ kWh/m}^2\text{m}$; atsipirkimo trukmė 20 metų. Pagal lentelės pradinius duomenis atliekami skaičiavimai geriausiai modernizacijos alternatyvai nustatyti.

Pageidaujama Siena 3 užima 13 vietą iš 32 galimų. Visi skaičiavimų duomenys pateikti A priede.

Nustatyta, kad racionaliausias gali būti toks variantas: Energetinės variacijos Nr. 174 (3.7 lentelė).

Numatyti langai

1 variantas – šilumos perdavimo koeficientas $U=1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$; darbų kaina – 60 743 EUR; metinis sutaupymas $29,63 \text{ kWh/m}^2\text{m}$; atsipirkimo trukmė 20 metų. Pagal lentelės pradinius duomenis atliekami skaičiavimai geriausiai modernizacijos alternatyvai nustatyti.

Šiame pastate numatomos:

3.30 lentelė. Nustatytas atitvarinių konstrukcijų modernizavimo alternatyvos variantas
Table 3.30. Identified modernization alternative variant of partition structures

Modernizavimo alternatyvos	Modernizavimo rodikliai						
	Šilumos perdavimo koeficientas U , W/m^2K	Modernizacijos kaina, Eur.	Prognozuojama priemonės gyvavimo trukmė, m.	Galimybė atlikti statybos darbus, neatsižvelgiant į sezoniskumą, balais	Metinis sutaupymas, $kWh/m^2/m$.	Atsipirkimo trukmė, m.	Konstrukcijos storis, mm
Cokolis 2 šiltinamas 800mm gylio ir 130 mm storio polisterino putplasčiu EPS 100, putplastis nutinkuojamas hidroizoliaciniu tinku. Naujai įrengiama nuogrinda aplink pastatą.	0,25	33694	25	2	2,91	112	610
Siena 3 šiltinama akmens vata 100 mm, akmens nuo vėjo vata 25 mm, paliekamas ventiliacinis tarpas 20 mm, tvirtinama fasadinė plokštė 10 mm.	0,25	122972	27	6	120	10	665
Stogas 1 pašalinama sena ruloninė danga ir sutvarkomos esamos šilumos izoliacijos medžiagos. Paklojamas 110 mm storio apatinis polistireno putplasčio EPS 80 sluoksnis. Paklojama 30 mm storio viršutinė kieta mineralinės vatos ROS 30 plokštė ir prilydoma dvisluoksniė ruloninė hidroizoliacijos danga. Apskardinami parapetai, izoliuojami vėdinimo kanalai.	0,25	35639	25	6	33,34	10	360
Minimizuojamas/ maksimizuojamas	min	min	max	max	max	min	max
Rodiklio reikšmės q	0,136	0,260	0,132	0,0485	0,155	0,216	0,052

Pageidaujama Siena 3 užima 13 vietą iš 32 galimų. Atitvarinės konstrukcijos numatomos tokios: cokolis 2; siena3; stogas1.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus Radviliškio manevrinio dispečerinio posto (Bokšto g. 13) pastato auditą ir įvertinus pastato atitvarinių konstrukcijų būklę (cokolis, rūšio sienos, išorinės sienos ir stogas), taip pat įvertinus vidaus konstrukcijų būklę (grindys, vidaus sienos perdangos, laiptai, vidaus durys), nustatyta, kad prieš sprendžiant modernizacijos uždavinį, būtina kiekvienai konstrukcijai atskirai įvertinti šilumos perdavimo koeficiento dydį, kadangi kiekvienu atveju vertinant pastatą gaunami skirtingi dydžiai, nes konstrukcijų nusidėvėjimas visuose pastatuose yra skirtingas.
2. Sukurtas erdvinis trimatis skaitmeninis, analizuojamo pastato, modelis. Šiam modeliui sukurti buvo panaudota 1000 persidengiančių nuotraukų ir programine įranga buvo sukurtas trimatis erdvinis modelis. Įvertinus sukurto modelio tikslumą (5 cm), nustatyta, kad tokiu būdu sukurtas modelis supaprastina pastato išorinių konstrukcijų skaičiavimus, kurie leido tiksliai įvertinti išorinių sienų, langų, stogo parametrus. Taip pat nustatyta, kad tokio modelio nauda yra reikšminga atliekant pastato auditą, kadangi pastatas yra Radviliškio mieste, tiek pastato vertintojui tiek projektuotojui nereikia, norint patikslinti duomenis, vykti iš kito miesto (pvz. Vilniaus), o tai sumažina laiko sąnaudas ir leidžia dirbti nuotoliniu būdu. Taip pat nustatyta, kad sukurto modelio tikslumas yra pakankamas naudoti projektuotojui kuriant BIM modelį ir šį modelį galima naudoti kaip pirminį informacijos šaltinį.
3. Įvertinus efektyviausių variacijos variantų rodiklius ir pritaikius sprendimų priėmimo matricą gauti 234 alternatyvų variantai. Gautas alternatyvas galima suskirstyti prioriteto tvarka pasirenkant efektyviausią variantą pagal energines sąnaudas, todėl toks suskirstymas padeda sumažinti analizuojamų alternatyvų skaičių.
4. Palyginus išmatuotų ir efektyviausių alternatyvų variantų konstrukcijų ir inžinerinių sistemų skirtumus, nustatyta, kad šie skirtumų įvertinimai gali garantuoti statybinių konstrukcijų ir inžinerinių sistemų normatyvines savybes ir toks būdas leidžia atmesti variantus, kurie šių savybių neužtikrina.
5. Nustatyta, kad parinkus keturias sienų, cokolio ir dvi stogo modernizacijos alternatyvas būtina kiekvienai parinktai alternatyvai taikyti šuos rodiklius: šilumos perdavimo koeficientą, modernizavimo kainą, prognozuojamą gyvavimo trukmę, įvertinti galimybę atlikti statybos darbus neatsižvelgiant į sezoniškumą, metinius energijos

sutaupymus bei konstrukcijos storį. Įvertinus šiuos rodiklius galima gauti detalią alternatyvų analizę.

6. Nustatyta, kad vertinant visas galimas alternatyvas pasinaudojant sprendimo priėmimo medžiu ir atlikus visų įmanomų alternatyvių modernizacijos kombinacijų įvertinimą remiantis trimis metodais (TOPSIS, SAW ir COPRAS) galima užtikrinti pakankamą gaunamų rezultatų tikslumą.
7. Įvertinus gautus skaičiavimus SyMAD3 metodu, nustatyta, kad galimų alternatyvų skaičių galima sumažinti nuo 234 alternatyvų iki 32 alternatyvų kombinacijų, o gautas alternatyvas suskirsčius pagal racionalumą galima nustatyti efektyviausią modernizacijos variantą. Nustatyta, kad vertinimo pastato geriausia alternatyvi modernizacijos kombinacija yra B11 (cokolis 1, siena 2, stogas 1).
8. Atlikus modernizacijos analizę ir dar papildomai įvertinus atsinaujinančių energijos šaltinių duomenis galima nustatyti efektyviausią modernizacijos variantą, siekiant gauti norimą energijos klasę atlikus modernizacijos darbus.

Bendrosios išvados

Apibendrinus disertacijos rezultatus galima teigti:

1. Atlikus analizę, nustatyta, kad jau projektavimo etape privaloma atsižvelgti į energijos vartojimą naudojant naujas technologijas.
2. Atlikus BIM technologijos taikymo analizę, nustatyta, kad ši technologija daugiausiai taikoma statant naujus pastatus, tačiau senų pastatų modernizacijai ji nėra taikoma, kadangi nėra sukurto metodo kaip tai daryti.
3. Nustatyta, kad senų visuomeninių pastatų modernizacijos modeliui aprašyti galima taikyti fotogrammetrinio būdu sukurto trimačio skaitmeninio modelio informaciją.
4. Suformuotas visuomeninio pastato modernizacijos modelio optimizavimo algoritmas, paremtas BIM technologija. Įvertinta, kad pasinaudojus šiuo metodu galima greičiau ir tiksliau parinkti efektyviausią modernizacijos variantą, kuris taip pat atitiktų ekonomišką ir tvaraus pastato parametrus.
5. Nustatyta, kad atliekant pastato analizę naudojantis fotogrammetrinio būdu sukurto modeliu galima tiksliau įvertinti išorinių sienų, langų, stogo parametrus ir sutaupyti laiko, kadangi duomenis galima tikslinti nuotoliniu būdu. Tokio sukurto modelio tikslumas yra pakankamas

naudoti projektuotojui kuriant BIM modelį ir šį modelį galima naudoti kaip pirminį informacijos šaltinį atliekant pastato modernizacijos modeliavimo darbus.

6. Atlikus pastato auditą, nustatyta, kad būtina įvertinti pastato vidaus ir išorės konstrukcijų šilumos perdavimo koeficiento dydį, kad būtų tinkamai parinktas modernizacijos variantas. Tokį vertinimą būtina atlikti kiekvieno modernizuojamo pastato atveju, nes konstrukcijų nusidėvėjimas visuose pastatuose yra skirtingas.
7. Sukurtas visuomeninių pastatų atnaujinimo technologijų modernizacijos modelis, kuris remiasi daugiakritere analize, taikant variantų medžio sintezės metodą. Naudojant modernizacijos priemonių atrankos derinius buvo suformuotas modernizacijos sprendimų priėmimo modelis. Nustatyta, kad taikant šį modelį galima užtikrinti rezultatų patikimumą ir parinkto modernizacijos varianto efektyvumą.
8. Patikrinus sukurtą modernizacijos optimizavimo algoritmo metodą, nustatyta, kad šio metodo privalumas yra automatizuotu būdu parenkamas efektyviausias modernizacijos variantas. Išanalizavus gautus rezultatus buvo nustatytas šio siūlomo metodo trūkumas – daug duomenų į skaičiavimo sistemas reikia įvesti rankiniu būdu.

Literatūra ir šaltiniai

Ahlborn, 2016. Šilumos srautų per išorines atitvaras ir temperatūrų matavimo principinė schema. Internetinė prieiga: < https://www.ahlborn.com/en_UK/heat-flux-measurement > [2017.03].

AIA, 2012. The American Institute of Architects (AIA). Integrating Energy Modeling in the Design Process; *The American Institute of Architects: Washington, DC, USA*, 2012.

Akcamete, A.; Akinci, B.; Garrett, J.H. 2010. Potential utilization of building models for planning maintenance activities, *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE)*, Nottingham, Britain.

Akinci, B.; Boukamp, F.; Gordon, C.; Huber, D.; Lyons, C.; Park, K. 2006. A formalism for utilization of sensor systems and integrated project models for active construction quality control, *Automation in Construction*, 15: 124–138.

Aksomitas, D. 2019. Statybos klasifikavimo sistemų palyginimas. Prieiga per internetą: <<https://skaitmeninestatyba.lt/aktualijos/d-aksomitas-statybos-klasifikavimo-sistemų-palyginimas/>> [žiūrėta 2019.05].

Aladag, H.; Demirdögen, G.; Isık, Z. 2016. Building information modeling (BIM) use in *Turkish construction industry*, *Procedia Engineering*, 161: 174–179.

Ali G.H.; Tongrui Z.; Okechukwu N.; Amirhosein G. H.; Nicola N.; John T.; Kaamran R. 2017. Application of nD BIM Integrated Knowledge-based Building Management System (BIM-IKBMS) for inspecting post-construction energy efficiency, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72: 935–949.

Altaweel, M. 2016. 3D modelių sudarymas naudojant fotogrammetriją. Internetinė nuoroda: <<https://www.gislounge.com/making-3d-models-photogrammetry/>> [žiūrėta 2018.09].

Amoruso F. M.; Dietrich U.; Schuetze T. 2018. Development of a Building Information Modeling-Parametric Workflow Based Renovation Strategy for an Exemplary Apartment Building in Seoul, Korea, *Sustainability*, 10 (12): 1–30.

Anil, E.B.; Tang, P.; Akinci, B.; Huber, D. 2011. Assessment of the quality of as is building information models generated from point clouds using deviation analysis, IS&T/SPIE Electronic Imaging, *International Society for Optics*, 78640F.

Arayici, Y. 2008. Towards building information modelling for existing structures, *Structural Survey*, 26: 210–222.

Aram, S.; Eastman, C.; Sacks, R. 2013. Requirements for BIM Platforms in the Concrete Reinforcement Supply Chain, *Automation in Construction*, 35, 1–17.

Archistar 2019. Archistar academy 2019. Internetinė nuoroda: <<https://academy.archistar.ai/a-comparison-between-cad-and-bim>> [žiūrėta 2019.05].

Atia, S.; Gratia, E.; de Herde, A.; Hensen, J.L.M. 2012. Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design, *Energy Building*, 49: 2–15.

Autodesk 2016. Annual Autodesk User event 2016. Internetinė prieiga: <https://www.linkedin.com/pulse/happy-present-introduction-building-information-annual-evaluation-koritsa/?utm_content=buffer8f57e&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer> [žiūrėta 2019.04].

Azhar, S.; Carlton, W.A.; Olsen, D.; Ahmad, I. 2011. Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis, *Automation in Construction*, 20: 217–224.

Balaras, C. A.; Drousa, K.; Dascalaki, E.; Kontoyiannidis, S. 2005. Heating energy consumption and resulting environmental impact of European apartment buildings, *Energy and Buildings*, 37(5): 429–442.

Barlish, K.; Sullivan, K. 2012. How to measure the benefits of BIM – A case study approach, *Automation in Construction*, 24: 149–159.

Becerik-Gerber, B.; Jazizadeh, F.; Li, N.; Calis, G. 2012. Application areas and data requirements for BIM-enabled facilities management, *Journal of Construction Engineering and Management*, 138: 431–442.

Bentley 2018, el.puslapis. Prieiga per internetą: <<https://www.bentley.com/en/products/brands/contextcapture>> [žiūrėta 2018.12].

BIM-Lt projektas, 2019. Pranešimas spaudai: „Skaitmeninė statybos sektoriaus ateitis kuriama jau dabar“, Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. Internetinė prieiga: <<https://am.lrv.lt/lt/naujienos/skaitmenine-statybos-sektoriaus-ateitis-kuriama-jau-dabar>> [žiūrėta 2019.04].

- Bordass, B.; Cohen, R.; Standeven, M.; Leaman, A. 2001. Assessing building performance in use 3: energy performance of the Probe buildings, *Building Research and Information*, 29: 114–128.
- Boukamp, F.; Akinci, B. 20017. Automated processing of construction specifications to support inspection and quality control, *Automation in Construction*, 17: 90–106.
- Bradley, A.; Li, H.; Lark, R.; Dunn, S. 2016. BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective, *Automation in Construction*, 71: 139–152.
- Bryde, D.; Broquetas, M.; Volm, J. M. 2013. The project benefits of Building Information Modelling (BIM), *International Journal of Project Management*, 31: 971–980.
- Bucon, R.; Sobotka, A. 2015. Decision-making model for choosing residential building repair variants, *Journal of Construction Engineering and Management*, 21: 893–901.
- Building smart, 2005. Building smart BIM standards 2005. Internetinė prieiga: <<https://buildinginformationmanagement.files.wordpress.com/2010/04/tco-linear.jpg>> [žiūrėta 2018.10].
- Carvalho J.P.; Bragança L.; Mateus R. 2019. Optimising building sustainability assessment using BIM, *Automation in Construction*, 102: 170–182.
- Cho, Y.S.; Alaskar, S.; Bode, T. 2010. BIM-integrated sustainable material and renewable energy simulation, *Proceedings of CRC2010*, Banff, Canada, 288–S. 297.
- Chong, H.-Y.; Lee, C.-Y.; Wang, X. 2017. A mixed review of the adoption of Building Information Modelling (BIM) for sustainability, *Journal of Cleaner Production*, 142(4): 4114–4126.
- Churchan C. W.; Ackoff R. L. 1954. An Approximate Measure of Value, *Journal of Operations Research Society of America*, 2(2): 172–187.
- Chwieduk D. A. 2017. Towards modern options of energy conservation in buildings, *Renewable Energy*, 101: 1194–1202.
- Cid-López, A.; Hornos, M.J.; Carrasco, R.A.; Herrera-Viedma, E. 2015. A hybrid model for decision-making in the information and communications technology sector, *Technological and economic development of economy*, 21: 720–737.
- Clarke, J.A. 2013. Energy Simulation in Building Design, second edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2013.
- Czarnigowska, A., A. Sobotka 2013. Time–cost relationship for predicting construction duration, *Archives Civil Mechanical Engineering*, 13(4): 518–526.
- Čereška, A.; Zavadskas, E.K.; Cavallaro, F.; Podvezko, V.; Tetsman, I.; Grinbergienė, I. 2016. Sustainable assessment of aerosol pollution decrease applying multiple attribute decision-making methods, *Sustainability*, 8(7): 586.
- Dai, F.; Lu, M. 2010. Assessing the accuracy of applying photogrammetry to take geometric measurements on building products, *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(2): 242–250.

Ding, L. Y. , Y. Zhou, H.B. Luo, X.G. Wu 2012. Using nD technology to develop an integrated construction management system for city rail transit construction, *Automation in Construction* 21(7): 64–73.

Directive 2010. Official Journal of the European Union, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, EPBD2010/31/EU.

Directive 2014/24/ES. Europos Parlamento ir tarybos direktyva 2014/24/ES; <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0024>> [žiūrėta 2018.02].

Directive 2018. Europos Parlamento ir tarybos direktyva (ES) 2018/844 2018 m. gegužės <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L0844&from=EN>> [žiūrėta 2018.12].

Direktyva 2012/27/ES, 2012. Europos Parlamento ir Tarybos Direktyva 2012/27/ES dėl energijos vartojimo efektyvumo. Internetinė prieiga: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=celex%3A32012L0027>> [žiūrėta 2017.10].

Dong Y., Thomas Ng S. 2015. A life cycle assessment model for evaluating the environmental impacts of building construction in Hong Kong, *Building and Environmental*, 89: 183–191.

Dzeng, R.-J.; Wang, W.-Ch.; Hsiao, F.-Y. 2015. Function-space assignment and movement simulation model for building renovation, *Journal Of Civil Engineering And Management*, 21(5): 578–590.

Dziadosz, A.; Konczak, A. 2016. Review of Selected Methods of Supporting Decision-Making Process in the Construction Industry, *Archives of Civil Engineering*, 62(1): 111– 126.

Eastman, C.; Teicholz, P.; Sacks, R.; Listo, K. 2008. BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. Hoboken (New Jersey): Wiley, p. 490.

Europe's building 2011. Europe's building under the microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings. Buildings Performance Institute Europe <http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf> [žiūrėta 2017.10].

European Commission 2011. Energy Efficiency Plan 2011, COM(2011) 109 final, <<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0109:FIN:EN:PDF>> [žiūrėta 2017.09].

European Commission 2014. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 up to 2030, COM(2014)16Final, <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A52014DC0015>> [žiūrėta 2017.10].

European Commission, Energy Roadmap 2050, COM(2011) 885 final. Internetinė prieiga: <<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2050-energy-strategy>> [žiūrėta 2018.12].

- Fan, S-L., Skibniewski, M. J.; Hung, T. W. 2014. Effects of Building Information Modeling During Construction, *Journal of Applied Science and Engineering*, 17(2):157–166.
- Friege, J.; Chappin, E. 2014. Modelling decisions on energy-efficient renovations: A review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 39: 196–208.
- Froese, T. 2003. Future directions for IFC-based interoperability. ITcon, 8, Special Issue IFC – Product models for the AEC arena, pp. 231–246, < <http://www.itcon.org/2003/17>> [žiūrėta 2019.03]
- Gervasio, H.; Santos, P.; Martins, R.; Simoes da Silva L. 2014. A macro-component approach for the assessment of building sustainability in early stages of design, *Building and Environment*, 73: 256–270.
- Goh, T.N. 1989. Some practical considerations in the design of manufacturing process experiments, *Journal of Mechanical Working Technology*, 20, 219–228.
- Gokce H., Gokce K. 2014. Multi dimensional energy monitoring, analysis and optimization system for energy efficient building operations, *Sustainable Cities and Society*, 10: 161–173.
- Golparvar-Fard, M.; Pena-Mora, F.; Savarese, S. 2011. Monitoring changes of 3D building elements from unordered photo collections, Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on, IEEE, 249–256.
- Gray, M.; Gray, J.; Teo, M.; Chi, S.; Cheung, F. 2013. Building Information Modeling, An International Survey, Brisbane, Australia, 2013.
- Gu, N.; London, K. 2010. Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry, *Automation in Construction*, 19: 988–999.
- Haapio, A.; Viitaniemi, P. 2008. A critical review of building environmental assessment tools, *Environmental Impact Assessment Review*, 28: 469–482.
- Habibi S. 2017. Micro-climatization and real-time digitalization effects on energy efficiency based on user behavior, *Building and Environment*, 114: 410–428.
- Harris J. 2013. Integration of BIM and business strategy, Masters of Project Management Program Department of Civil and Environmental Engineering McCormick School of Engineering and Applied Science Northwestern University Evanston, IL <<https://docplayer.net/12320707-Integration-of-bim-and-business-strategy-joe-harris.html>>
- Hattab, M.; Hamzeh, F. 2015. Using social network theory and simulation to compare traditional versus BIM–lean practice for design error management, *Automation in Construction*, 52: 59–69.
- Hemsath, T. 2013. Conceptual Energy Modeling for Architecture, Planning and Design: Impact of Using Building Performance Simulation in Early Design Stages. In Proceedings of the BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, 26–28 August 2013; pp. 376–384.

Hernandez, A. A.; Matesanz, P. A.; Rodriguez-Suarez, I.; Garcia, M. C. 2015. Evolution of urban renewal policies in Areas of Integrated Renovation in Spain (1978–2012), *Informes De La Construcción*, 67(1): 24.

HN 42:2009. Gyvenamųjų ir visuomeninių pastatų patalpų mikroklimatas, Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministro įsakymas dėl Lietuvos higienos normos HN 42:2009 „Gyvenamųjų ir visuomeninių pastatų patalpų mikroklimatas“ patvirtinimo 2009 m. gruodžio 29 d. Nr. V-1081, Vilnius.

Hwang C., Yoon K. 1981. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, A State of the Art Survey. 1981, Springer-Verlag, New York, NY.

Yan, H.; Damian, P. 2018. Benefits and Barriers of Building Information Modelling, Proceedings of the 12th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Beijing, China, 16–18 October 2008.

Ignatavičius Č.; Kalibatas D.; Kutut V.; Ustinovičius L. 2012. Pastatų rekonstrukcijos ir remonto technologijos mokomoji knyga, Vilnius „Technika“ 2012.

Ignatavičius, Č.; Skrodenis, S. V. 2011. Daugiabučių namų atnaujinimui (modernizavimui) skirtų tipinių detalių bei priemonių katalogas. Internetinė nuoroda: <<http://www.betalt.lt/doclib/6izmddh7tfuh98mzywpwq9jsyrdcehez>> [žiūrėta 2017.09].

Young, N.W.; Jones, Jr.S.A.; Bernstein, H.M.; Gudge, J.E. 2009. The business value of BIM, McGraw Hill, New York. <http://images.autodesk.com/adsk/files/final_2009_bim_smartmarket_report.pdf> [žiūrėta 2017.02].

ISO 6946:2017. Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods, p.40.

Jeong, H. H.; Park, J. W.; Kim, J. S.; Choi, C. U. 2016. Assessing the Accuracy of Ortho-image using Photogrammetric Unmanned Aerial System. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1, 867–872.

Jia Wen T., Chin Siong H., Noor Z.Z. 2015. Assessment of embodied energy and global warming potential of building construction using life cycle analysis approach: case studies of residential buildings in Iskandar Malaysia, *Energy and Buildings*. 93: 295–302.

Jia, J.; Sun, J.; Wang, Z.; Xu, T. 2017. The construction of BIM application value system for residential buildings' design stage in China based on traditional DBB mode, *Procedia Engineering*, 180: 851–858.

Jose P. C., Luis B., Ricardo M. 2019. Optimising building sustainability assessment using BIM, *Automation in Construction* 102: 170–182.

Jrade, A.; Jalaei, F. 2013. Integrating building information modelling with sustainability to design building projects at the conceptual stage, *Building Simulation*, 6: 429–444.

- Jung, J.; Hong, S.; Jeong, S.; Kima, S.; Cho, H.; Hong, S.; Heo, J. 2014. Productive modeling for development of as-built BIM of existing indoor structures, *Automation in Construction*, 42: 68–77.
- Jung, Y.; Joo, M. 2011. Building information modelling (BIM) framework for practical implementation, *Automation in Construction*, 20: 126–133.
- Kaklauskas A.; Zavadskas E.K.; Raslanas S.; Ginevicius R.; Komka A.; Malinauskas P. 2006. Selection of low-e windows in retrofit of public buildings by applying multiple criteria method COPRAS: A Lithuanian case, *Energy and Buildings*, 38 (5): 454–462.
- Kamel E., Memari A. M. 2019. Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions, *Automation in Construction*, 97: 164–180.
- Kibert, C. J. 1994. Establishing principles and a model for sustainable construction, *Sustainable Construction: Proceedings of the First International Conference of CIB TG 16*, November 6–9, Center for Construction and Environment, M.E. Rinker Sr. School of Building Construction, College of Architecture, University of Florida, Tampa, Florida, 1994 9780964388611, p. 888 ISBN.
- Kibert, C. J. 2016. *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*, 4th ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2016; p. 23.
- Kim, C.; Son, H. 2013. Fully automated registration of 3D data to a 3D CAD model for project progress monitoring, *Automation in Construction*, 35: 587–594.
- Kim, C.; Son, H.; Kim, C. 2013. Automated Construction Progress Measurement Using a 4D Building Information Model and 3D Data, *Automation in Construction*, 31: 75–82.
- Kim, J.; Ryu, J.; Choo, S. 2013. An Analysis on Effectiveness of BIM-based Area Calculation Method for Improving Quality of Korean Apartment Housing, *Journal Korean House Association*, 24: 45–52.
- Klee A. J. 1971. The Role of Decision Models in the Evaluation of Competing *Environmental Health Alternatives*. *Management Science*, 18(2): 52–67.
- Klein, L.; Li, N.; Becerik-Gerber 2012. Imaged-based verification of as-built documentation of operational buildings, *Automation in Construction*, 21: 161–171.
- Kreider, R.; Messner, J.; Dubler, C. 2010. Determining the frequency and impact of applying BIM for different purposes on projects, *Proceeding 6th International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC)*, Pennsylvania State University, University Park, PA, USA. Internetinė prieiga: <: http://bim.psu.edu/uses/Freq-Benefit/BIM_Use-2010_Innovation_in_AEC-Kreider_Messner_Dubler.pdf> [žiūrėta 2017.04].
- Kreiner, H.; Passer, A.; Wallbaum, H. 2015. A new systemic approach to improve the sustainability performance of office buildings in the early design stage, *Energy and Buildings*, 109: 385–396.
- Książek, M.V.; Nowak, P.O.; Kivrak, S.; Roslon, J.H.; Ustinovichius, L. 2015. Computer-aided decision-making in construction project development, *Journal Civil Engineering and Management*, 21: 248–259.

- Lee, K. H.; Kim, I. H.; Choo, S. Y. 2015. Model study of design components for energy-performance-based architectural design using bim lod 100, *Journal of Green Building*, 10(2): 179–197.
- Lee, S.; Ha M. 2013. Customer interactive building information modeling for apartment unit design. *Automation in Construction*, 35: 424–430.
- Leite, F.; Akcamete, A.; Akinci, B.; Atasoy, G.; Kiziltas, S. 2011. Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models, *Automation in Construction*, 20 (2011) 601–609.
- Li Y.; Song H.; Sang P.; Chen P.-H.; Liu X. 2017. A review of studies on green building assessment methods by comparative analysis, *Energy and Buildings*, 146:152–159.
- Li M.; Yang J. 2014. Critical factors for waste management in office building retrofit projects in Australia, Resources, *Conservation and Recycling*, 93, 85–98.
- Lin, B.; Liu, H. 2015. A study on the energy rebound effect of China's residential building energy efficiency, *Energy and Buildings*, 86: 608–618.
- Linderoth, H. C. J. 2010. Understanding adoption and use of BIM as the creation of actor networks, *Automation in Construction*, 19 (1): 66–72.
- Lombera, S. J.; Rojo, C. J. 2010. Industrial building design stage based on a system approach to their environmental sustainability, *Construction and building materials*, 24, 438–447.
- Love, P.E.D.; Matthews, J.; Simpson, I; Hill, A.; Olatunji, O.A. 2014. A benefits realization management building information modeling framework for asset owners, *Automation in Construction*, 37: 1–10.
- Ma, Z.; Cooper, P.; Daly, D.; Ledo, L. 2012. Existing building retrofits: methodology and state- of- the-art, *Energy Building*, 55: 889–902.
- MacCrimmon K.R. 1968^a. Decisionmaking among multiple-attribute alternatives: a survey and consolidated approach, DTIC Document.
- MacCrimmon, K.R., 1968^b. Descriptive and Normative Implications of the Decision-Theory Postulates. In: Borch K., Mossin J. (eds) Risk and Uncertainty. International Economic Association Conference Volumes, Numbers 1–50. Palgrave Macmillan, London Descriptive and Normative Implications of the Decision-Theory Postulates.
- Mahdavi A.; Tahmasebi F.; 2015. Predicting people's presence in buildings: An empirically based model performance analyses, *Energy and Buildings*, 86: 349–355.
- Maile, T.; Fischer, M.; Bazjanac, V. 2007. Building energy performance simulation tools—a life-cycle and interoperable perspective, Stanford University, Stanford, CA, USA. Internetinè
 <http://automatica.dei.unipd.it/public/Schenato/PSC/2010_2011/gruppo4-Building_termo_identification/IdentificazioneTermodinamica20072008/Biblio/Articoli/Standorf%20Univ%20Performance%20Buildings.pdf> [žiūrėta 2018.02].

- Majcen, D.; Itard, L.C.M.; Visscher, H. 2013. Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: discrepancies and policy implications, *Energy Policy*, 54: 125–136.
- Martinaitis(a), V.; Zavadskas, E. K.; Motuzienė, V.; Vilutienė, T. 2015. Importance of occupancy information when simulating energy demand of energy efficient house: A case study, *Energy and Buildings*, 101: 64–75.
- Martinaitis(b), V.; Bieksa, D.; Rogoza, A.; Savickas R. 2015. Quantitative estimation of improvements in the efficiency of district heating substation control system, *Building Services Engineering Research & Technology*, 36(4), 455–468.
- Mateus, R.; Braganca, L. 2011. Sustainability assessment and rating of buildings: developing the methodology SBTToolPT–H, *Building and Environment*, 46: 1962–1971.
- Menezes, A.C.; Cripps, A.; Bouchlaghem, D.; Buswell, R. 2012. Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: using post- occupancy evaluation data to reduce the performance gap, *Applied Energy* 97: 355–364.
- Merschbrock, C.; Figueres-Munoz, A. 2015. Circumventing obstacles in digital construction design - a workaround theory perspective, *Procedia Economics and Finance* 21: 247–255.
- Miettinen, R.; Paavola, S. 2014. Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling, *Automation in Construction*, 43: 84–91.
- Migilinskas, D.; Popov, V.; Juocevicius, V.; Ustinovichius, L. 2013. The Benefits, Obstacles and Problems of Practical Bim Implementation, *Procedia Engineering*, 57: 767– 774.
- Migilinskas, D.; Ustinovichius, L. 2006. Computer-aided modelling, evaluation and management of construction project according PLM concept, *Lecture Notes in Computer Science*, 4101, 242–250.
- Mill, T.; Alt, A.; Liias, R. 2013. Combined 3D building surveying techniques — terrestrial laser scanning (TLS) and total station surveying for BIM data management purposes, *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(1): 23–32.
- Mjoernell, K.; Boss, A.; Lindahl, M.; Molnar, St. 2014. A Tool to Evaluate Different Renovation Alternatives with Regard to Sustainability, *Sustainability*, 6(7): 4227–4245.
- Motawa, I. 2017. Spoken dialogue BIM systems – an application of big data in construction, *Facilities*, 35(13-14): 787–800.
- Nawari, N.O.; Kuenstle, M. 2015. Building Information Modeling – Framework for Structural Design, *Taylor & Francis*, 2015 (ISBN-10: 1482240432).
- Nepal, M.; Staub-French, S.; Zhang, J.; Lawrence, M.; Pottinger, R. 2008. Deriving construction features from an IFC model, *Proceedings of the CSCE 2008 Annual Conference*, Quebec, Canada.

- Ning, G.; Junnan, L.; Yansong, D.; Zhifeng, Q.; Qingshan, J.; Weihua, G.; Geert, D. 2017. BIM-based PV system optimization and deployment, *Energy and Buildings*, 150: 13–22.
- Okakpu A.; Ghaffarianhoseini, A.; Ghaffarianhoseini, A.; Tookey, J.; Haar, J. M.; Rehman, A. U. 2018. A proposed framework to investigate effective BIM adoption for refurbishment of building projects, *Architectural Science Review*, 61(1):1–13.
- Omniclass. Internetinė prieiga: <<http://www.omniclass.org/about/>> [žiūrėta 2018.04].
- Ordenez, C.; Martínez, J.; Arias P.; Armesto, J. 2010. Measuring building façades with a low-cost close-range photogrammetry system, *Automation in Construction*, 19: 742–749.
- Per A. J.; Esmir M.; Jakob B. B.; Christian T. 2018. 10 questions concerning sustainable building renovation, *Building and Environment*, 143: 130–137.
- Perez N.; Baird G.; Buchanan A. 2008. The influence of construction materials on the life cycle energy use and carbon dioxide emission of medium sized commercial buildings. In: Proceedings of the World Conference Sustainable Building Conference (Melbourne, Australia); 2008. p. 244–251.
- Petri, I.; Beach, T.; Rana, O.F.; Rezgui, Y. 2017. Coordinating multi-site construction projects using federated clouds, *Automation in Construction*, 83: 273–284.
- Pinheiro, S.; Donnell, J.; Wimmer, R.; Bazjanac, V.; Muhic, S.; Maile, T.; Frisch, J.; Treeck, C. 2018. Model view definition for advanced building energy performance simulation, CESBP/BauSIM 2016 Conference, Dresden, Berlin. Prieiga per internetą: <<http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2016/D-02-1.pdf>> [žiūrėta 2017.02].
- Popov, V.; Juocevicius, V.; Migilinskas, D.; Ustinovichius, L.; Mikalauskas, S. 2010. The use of A Virtual Building design and Construction model for developing an effective Project concept in 5D environment, *Automation in construction*, 19(3): 357–367.
- Porwal, A.; Hewage, K.N. 2013. Building information modeling (BIM) partnering framework for public construction projects, *Automation in construction*, 31: 204–214.
- Ramaji, I.J.; Messner, J.I.; Leicht, R.M. 2016. Leveraging building information models in IFC to perform energy analysis in OpenStudio, ASHRAE and IBPSA-USA SimBuild 2016, Salt Lake City, 2016 <<http://ibpsa-usa.org/index.php/ibpsa/article/view/365/351>>.
- Rasiulis R., 2017. Statinio informacinio modeliavimo technologijomis grįstas modelis administracinių pastatų atnaujinimui vertinti, daktaro disertacija, VGTU leidykla Technika, 2017.
- Rau, J.-Y.; Cheng, C.-K. 2013. A cost-effective strategy for multi-scale photo-realistic building modeling and web-based 3-D GIS applications in real estate. *Computers, Environment and Urban Systems*, 38, 35–44.
- RB Rail AS 2019. BIM Manual. Prieiga per internetą: <http://www.railbaltica.org/wp-content/uploads/2019/04/RBR-DOC-BIM-BMA-0001_BIMManual-2.pdf> [žiūrėta 2019.04].
- Reeves T.; Olbina S.; Raja R. A. 2015. Guidelines for Using Building Information Modeling for Energy Analysis of Buildings, *Buildings*, 5: 1361–1388.

- Reizgevičius, M.; Ustinovičius, L.; Cibulskienė D.; Kutut V. 2018. Promoting Sustainability through Investment in Building Information Modeling (BIM) Technologies: A Design Company Perspective, *Sustainability*, 10(3):600.
- Rodrigues F., Matos, R.; Alves, A.; Ribeiro, P.; Rodrigues, H. 2018. Building life cycle applied to refurbishment of traditional building from Oporto, *Portugal, Journal of building engineering*, 17: 84–95.
- Saaty T. L. 1994. Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the AHP. RWS Publications, Pittsburgh, PA, USA.
- Salih, N.J. 2013. BIM and Sustainable Design. Prieiga per internetą: <<http://buildipedia.com/aec-pros/design-news/bim-and-sustainable-design>> [žiūrėta 2017.12].
- Salman A. 2011. Building Information Modeling (BIM): trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry, *Leadership and Management in Engineering* 11(3): 241–252.
- Schwab, K. 2015. The Fourth Industrial Revolution. Internetinė prieiga: <<https://www.foreignaffairs.com/articles/2015-12-12/fourth-industrial-revolution>> [žiūrėta 2018.09].
- Sen, S. 2012. The Impact of BIM/VDC on ROI: Developing a Financial Model for Savings and ROI Calculation of Construction Projects. Master's Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Simanavičienė, R.; Liaudanskiene, R.; Ustinovichius, L. 2012. A new synthesis method of structural, technological and safety decisions (SyMAD-3), *Journal of civil engineering and management*. Vilnius 18(2): 265–276.
- Simanavičienė, R.; Ustinovičius, L. 2014. A new approach to assessing the biases of decisions based on multiple attribute decision making methods, *Electronics and electrical engineering (Elektronika ir elektrotechnika)*. Kaunas : Technologija. ISSN 1392-1215.: 117 1, p. 29–32.
- Singh A.; Berghorn G.; Joshi S.; Syal M. 2009. Review of life-cycle assessment applications in building construction, *Journal of Architectural Engineering*, 17(1):15–23.
- Singh, V.; Gu, N.; Wang, X.; 2011. A theoretical framework of a BIM-based multidisciplinary collaboration platform, *Automation in Construction*, 20:134–144.
- Skaitmeninė statyba, 2014. VŠĮ „Skaitmeninė statyba“ BIM ekspertai, 2014. Skaitmeninės statybos Lietuvoje gairės 2014-2020. Prieiga per internetą: <https://skaitmeninestatyba.lt/wp-content/uploads/2017/12/140724_Skaitmenines_statybos_Lietuvoje_2014-2020_GAIRES_v21.pdf> [žiūrėta 2018.05].
- Somboonwit, N.; Boontore, A.; Rugwongwan, Y. 2017. Obstacles to the automation of building performance simulation: adaptive building integrated photovoltaic (BIPV) design, 5th AMER International Conference on Quality of Life, 25–27 February 2017, Bangkok, Thailand.

Sputnik, 2019. Fotogrammetrinio modelio pavyzdys naudojamas statybų priežiūrai. Internetinė prieiga: <<https://sputnik.geoscan.aero/location/4476?accessCode=i3wp6y4pgwk6zx5ftzots5tsybgm2loxsf2ct6c6wodnef3c&ll=59.341787254%2C26.350430045&z=484.88&heading=0.035&pitch=-0.835&roll=0.001&mode2D=false>> [žiūrėta 2019.05].

STR 1.01.03:2017 „Statinių klasifikavimas“, Lietuvos Respublikos aplinkos ministro įsakymas dėl statybos techninio reglamento STR 1.01.03:2017 „Statinių klasifikavimas“ patvirtinimo, 2016 m. spalio 27 d. Nr. D1-713, Vilnius.

STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“, Lietuvos Respublikos aplinkos ministro įsakymas dėl statybos techninio reglamento STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ patvirtinimo, 2016 m. lapkričio 11 d. Nr. D1-754, Vilnius.

STR 2.02.02:2004 „Visuomeninės paskirties statiniai“, Lietuvos Respublikos aplinkos ministro įsakymas dėl statybos techninio reglamento STR 2.02.02:2004 „Visuomeninės paskirties statiniai“ patvirtinimo, 2004 m. vasario 27 d. Nr. D1-91, Vilnius.

Suder, A.; Kahraman, C. 2016. Multicriteria analysis of technological innovation investments using fuzzy sets, *Technological and Economic Development of Economy*, 22(2): 235–253.

Sun, S.; Kensek, K.; Noble, D.; Schiler, M. 2016. A method of probabilistic risk assessment for energy performance and cost using building energy simulation, *Energy and Buildings*, 110: 1–12.

Sunikka-Blank M.; Galvin R. 2012. Introducing the rebound effect: the gap between performance and actual energy consumption, *Building Research and Information*, 40(3): 260–273.

Taylor J. E., Bernstein P. 2009. Paradigm trajectories of building information modeling practice in project networks, *Journal of Management in Engineering* 25(2): 69–76.

Tobias, L.; Vavaroutsos, G. 2009. Retrofitting Office Buildings to Be Green and Energy Efficient: Optimizing Building Performance, Tenant Satisfaction, and Financial Return, Urban Land Institute (ULI), Washington, DC, 2009.

Tulenheimo, R. 2015. Challenges of implementing new technologies in the world of BIM: Case study from construction engineering industry in Finland, *Procedia Economic Finance*, 21: 469–477.

Uniclass 2015. Internetinė prieiga: <<https://www.thenbs.com/knowledge/what-is-uniclass-2015>> [žiūrėta 2018.12].

Urbšys A. 2016. BIM and Beyond – Baltijos turas, iš pristatymo medžiagos, 2016 10 18 Vilnius.

Ustinovichius, L.; Zavadskas, E. K.; Podvezko, V. 2007. Application of a quantitative multiple criteria decision making (MCDM-1) approach to the analysis of investments in construction, *Control and Cybernetics* 36(1): 256–268.

- Ustinovičius L.; Zavadskas E. K. 2004. Statybos investicijų efektyvumo sistemotechninis įvertinimas (Assessment of investment profitability in construction from technological perspectives). Vilnius, Technika, 220 p.
- Ustinovičius, L.; Rasiulis, R.; Nazarko, Ł.; Vilutienė, T.; Reizgevičius, M. 2015. Innovative research projects in the field of Building Lifecycle Management, *Procedia Engineering*, 122: 166–171.
- Vandevoorde, D.; Pamplona, M.; Schalma, O.; Vanhellemont, Y.; Cnuded, V.; Verhaeven, E. 2009. Contact sponge method: Performance of a promising tool for measuring the initial water absorption, *Journal of Cultural Heritage*, 10(1): 41–47.
- Vladimir V. T. 2011. Osnovy BIM: vvedenie v informacionnoe modelirovanie zdaniy. Moskva 2011, DMK PRESS.
- Volk, R.; Stengel, J.; Schultmann, F. 2014. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings-Literature review and future needs, *Automation in Construction*, 38: 109–127.
- Waldo G.; Mieke V., Niels De T. 2015. Life cycle costing as an early stage feasibility analysis: The adaptable transformation of Willy Van Der Meeren's student residences, 8th Nordic Conference on Construction Economics and Organization, *Procedia Economics and Finance* 21, 14–22.
- Wang N., Adeli H. 2015. Self-constructing wavelet neural network algorithm for nonlinear control of large structures, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 41: 249–258.
- Wang, N.; Chang, Y.-C.; Nunn, C. 2010. Lifecycle assessment for sustainable design options of a commercial building in Shanghai, *Building and Environment*, 45(6): 1415–1421.
- Wong J. K. W.; Kuan K. 2014. Implementing 'BEAM Plus' for BIM-based sustainability analysis, *Automation and Construction*, 44: 163–175.
- World economic forum, 2018. Future Scenarios and Implications for the Industry 2018. Internetinė prieiga: < <https://www.weforum.org/agenda/2018/06/construction-industry-future-scenarios-labour-technology/> > [2019.01].
- Zanni, M.-A.; Soetanto, R.; Ruikar, K. 2014. Defining the sustainable building design process: methods for BIM execution planning in the UK, *International Journal of Energy Sector Management*, 8(4):562–587.
- Zavadskas E.K.; Kaklauskas A.; Banaitis A.; Kvederyte N. 2004. Housing credit access model: The case for Lithuania, *European Journal of Operational Research*, 155 (2): 335–352.
- Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A. 1996. Multiple criteria evaluation of buildings. Vilnius: Technika.
- Zhang, J.; Seet, B.-C.; Lie, T.T. 2015. Building information modelling for smart built environments, *Buildings*, 5: 100–115.

Zolfani, S. H.; Sedaghat M.; Maknoon, R.; Zavadskas, E. K. 2015. Sustainable tourism: a comprehensive literature review on frameworks and applications, *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28(1): 1–30.

Zolfani, S.H.; Maknoon, R.; Zavadskas, E.K. 2016. Multiple attribute decision making (MADM) based scenarios. *International Journal Strategic Property Management*, 20: 101– 111.

Zuo, J.; Zillante, G.; Xia, B.; Chan, A.; Zhao, Z. 2015. How Australian construction contractors responded to the economic downturn, *International Journal Strategic Property Management*, 19: 245–259.

Žėkas V., Martinaitis V., Streckienė G., Vilutienė T. 2014. A quantitative evaluation of theoretical renewable energy potential of the building site, *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(6): 873–883.

Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Rasiulis, R.; Ustinovichius, L.; Migilinskas, D.; Cepurnaite, J.; Virbickas, A. 2015. Energy efficiency of a public building renovation and reconstruction using base model passive house and BIM technology, *Engineering structures and technologies* 7(3): 114–125, (ICV 7,17), (Clarivate Analytics Web of Science). ISSN(online)2300-0813.

Ustinovičius, L.; Walasek, D.; Rasiulis, R.; Cepurnaite, J. 2015. Implementation of information technologies in construction – practical case study, *Economics and Management* 7(1):290–310. Journal indexed in Index Copernicus (ICV 7,17), ERIH PLUS, Google Scholar, BazTech and BazEkon. ISSN(online)2300-0813. <http://dx.doi.org/10.12846/j.em.2015.04.06>

Ustinovičius L., Popov V., Cepurnaite J., Vilutienė T., Samafalov M., Miedzialowski C. 2017 BIM-based processes management model for building design and refurbishment, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 18, 1136–1149. Q1

Ustinovičius L., Puzinas A., Starynina J., Vaišnoras M., Černiavskaja O., Kontrimovičius R. BIM technology difficulties in Project planning. *Engineering Management in Production and Services*, volume 10, issue 2, 16–29. Bialystok 2018. *Index Copernicus* (ICV 7,17)

Straipsniai kituose leidiniuose

Čepurnaitė J., Ustinovičius L., Vaišnoras M. 2017. Modernization with BIM technology through scanning Building information. *Procedia Engineering Journal*. Volume 208, 2017, 8–13, OI information: 10.1016/j.proeng.2017.11.014.

Kontrimovičius R., Černiavskaja O., Vaišnoras M., Puzinas A., Starynina J. „BIM (SIM) technologijų naudojimo sunkumai statyboje“ 21-oje jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, sekcija „Statyba“. Elektroninis leidinys.

Starynina, J.; Ustinovičius, L.; Vaišnoras, M. 2019. Sustainable modernization method to increase energy performance of the public buildings using BIM techniques, 17th international colloquium "Sustainable decisions in built environment", 1–4. <https://doi.org/10.3846/colloquium.2019.004>.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

The European Commission Communication “A Strategy for the Sustainable Competitiveness of the Construction Sector and Enterprises in the Construction Sector” (SWD 2012) identifies the EU construction sector as having a significant impact on the economic development of the EU by generating around 10% of GDP and 20 million jobs. Starting in 2019, all new buildings in the countries of the EU must become nearly zero-energy buildings. With the rapid development of construction and information and telecommunications technologies in the world, it is necessary to respond, shape and implement a unified digital construction information model. The analysis of various sources revealed that currently there is no building information model (BIM), evaluation methodology of public building modernization project in Lithuania that is in line with the realities of the construction market, and unclear efficiency evaluation criteria during the whole life of the building. It was found that there is no uniform mathematically based methodology abroad either. A system for evaluation of building information modeling (BIM) project for the modernization of public buildings has been developed. As the conditions change, the model can be refined as new assumptions are formulated. The research carried out within the scope of this project will help the PhD project promoter to successfully implement the objectives of the dissertation. The results of the project will have a long-term impact on the development of technological, social and humanitarian sciences.

The scientific problem of the dissertation is formulated with the question - how should the improvement of energy efficiency of public buildings be evaluated by the means of sustainable design and modernization methods.

The dissertation suggests a modernization algorithm methodology and a multi-criteria estimation model to solve this problem. The methodology is being adapted using new technologies such as photogrammetry and BIM technologies, which are already used in construction.

The solution to the dissertation problem and the practical applicability of the obtained results would positively influence the technological development of the Lithuanian construction sector. A system for evaluation of building information modeling (BIM) project for the modernization of public buildings has been developed.

Relevance of the thesis

Buildings and engineering infrastructure in Lithuania use about 50% of the country's total material investment, building materials production processes, and operating buildings and structures account for about 50% of total energy consumption. The Energy Performance of Buildings Directive and the Energy Efficiency Directive provide the increase of modernization, especially of public buildings. Setting directions or retrofitting buildings to become zero-energy buildings means that the construction sector needs a major overhaul of its working practice. Renovation of buildings in developed countries of the EU began more than 20 years ago, but today many Member States of the EU are still facing the problem that is being analyzed. The European Parliament and the Council are focusing their policies on strengthening energy efficiency, health and environmental standards for buildings, increasing funding for energy efficiency and promoting renewable energy, and are determined to achieve certain energy and environmental goals by the year 2020. Renovation of residential buildings (blocks of flats) is the subject of most of the public debates. But according to the EU policies, public buildings (PPs) must become an example of energy saving and environmental protection, and therefore energy efficiency should be the first priority.

The influence of the construction sector is significant due to its high added value and the number of jobs. The sector also has an affect on transport, logistics, sustainable environment, energy, information technology and other sectors. The results of this research work are applied at the design stage, which is why this modernization methodology can be applied to any non-energy efficient buildings and in different climate zones.

The object of the research

Evaluation of the efficiency of modernization options and solutions for public buildings, and the development of an algorithm based on digital technologies (BIM).

The aim of the thesis

The aim of this work is to develop a conceptual model of the Public Buildings Modernization System for the Construction Sector of Lithuania and an algorithm based on this developed conceptual model by applying harmonized design, decision-making, quality control and monitoring methods to a building information modeling (BIM) environment.

The objectives of the thesis

The objectives of the work are:

1. To examine the literature of energy efficiency improvement measures and solution efficiency studies carried out using BIM technology.
2. To develop an optimization algorithm of old public buildings modernization in order to implement the energy efficiency of the building using the basics of BIM technology.
3. To apply the possibilities of the created digital three-dimensional building model for building modernization.
4. To develop a conceptual model of the modernization system of the public buildings and the conceptual model-based algorithm.
5. To test data analysis of the building to be modernized using the optimization model. To determine the benefits of solution efficiency by applying the basics of BIM technology.

Research methodology

Preparation of the thesis is based on publications of foreign and Lithuanian scientists, researches, data of construction companies, construction and design regulating laws, construction technical regulations, construction law, BIM standards. Experimental evaluation, systematization of data, graphical representation of data are performed. The decision-making method, method of synthesis of modernization options, multicriteria analysis are used to evaluate the efficiency of modernization. Publications of various construction industry institutions, reports, statistics of Lithuanian and foreign institutions are used. Technical information of BIM software manufacturers, various reports, methodology of calculating payback are analyzed.

Scientific novelty of the thesis

During the preparation of the dissertation, the following results are obtained for civil engineering science:

1. A conceptual model for modernization of energy efficiency in public buildings and an algorithm based thereon by applying sustainable design, decision making, quality control, and monitoring methods to building information modeling (BIM) environment.
2. Modernization of public building technology using optimization model algorithm, which is integrated into BIM technology.
3. Optimization model developed to modernize buildings by improving their energy performance and maintaining the principles of sustainable and green building.

Practical value of the research findings

The developed modernization algorithm model can be applied to BIM environment for planning or development of housing projects and for building modernization. These research results are useful for investment project developers, designers and constructors, building owners, as the system generates thousands of alternative recommendations and selects the most rational options for a specific case for safe and healthy housing. The obtained results can also be applied to the planning of static energy losses of state institutions in the framework of modernization strategies.

Defended statements

1. The optimization algorithm model is developed, which can be applied to information modeling (BIM) environment, modernization and reconstruction of public buildings.
2. The solution model for modernization screening measures has been developed, which allows to determine the most effective combination of structural and engineering equipment solutions when renovating buildings.
3. By analyzing the application of building modernization and the benefits of BIM, it is possible to develop an automated building modernization decision making algorithm

Approval of the research findings

7 scientific articles have been published on the topic of the dissertation. One of which is included in the ISI Web of Science list (Ustinovich *et al.* 2017); three included in the SCOPUS list (Ustinovich *et al.* 2017, Ustinovich *et al.* 2018, Cepurnaitė *et al.* 2017); one in the conference proceedings ISI Proceedings (Čepurnaitė *et al.* 2017); three – In other peer-reviewed foreign and Lithuanian scientific publications (Rasiulis *et al.* 2015, Ustinovičius *et al.* 2015), one article – in peer-reviewed Lithuanian conference proceedings (Kontrimovičius *et al.* 2018), one article – in peer-reviewed Lithuanian conference

proceedings (Starynina et al. 2019). The results of the research were published at four scientific conferences in Lithuania and abroad:

- International Conference on Innovative Solutions in Construction Engineering and Management: 16th Lithuanian-German-Polish Colloquium and 6th Meeting of EURO Working Group on Operational Research in Sustainable Development and Civil Engineering 24 May – 2nd International Workshop on Flexibility in Sustainable Construction, ORSDCE 2017 April 24–26, 2017, Poznan, Poland;
- The 21st Conference of Young Scientists, Science – Future of Lithuania, in the Construction section, April 2018, Vilnius;
- The 29th European Conference on Operational Research, 8–11 July 2018, Valencia, Spain;
- International Conference “17th Colloquium on Sustainable Decisions in Built Environment and Meeting of EURO Working Group OR in Sustainable Development and Civil Engineering” on May 15, 2019, Vilnius.

The results of the research were presented at a seminar at Białystok University, Poland on 7 March 2019.

In the April of 2017, an internship was completed at Aalborg University in Denmark. Information about BIM deployment collected during the internship.

The structure of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, lists of literature and sources and author's scientific publications on the topic of the dissertation, English summary and annexes.

1. Analysis of scientific literature on public building reconstruction possibilities

Buildings have a significant impact on human health, well-being and the environment. Old buildings use resources, waste and are expensive to maintain and operate. Achieving full energy efficiency in buildings is a passive house approach to design, build and operate buildings to increase productivity and reduce energy costs, reduce resource use, reduce waste and environmental impact, and reduce life cycle costs. Energy Map 2050 and 2030 European Energy urges greater focus on energy efficiency in the housing sector, as it is the largest energy consumer in Europe, accounting for almost 40 % of total energy consumption (European Commission 2011, 2014; Energy Roadmap 2050; Directive 2010).

Based on the construction products from which the building was constructed and the climatic conditions that influence it, the structures are classified according to their intended use with life expectancy in years (STR 1.12.06: 2002).

The life span of the building depends on how the structure was operated, the construction products used in the structure, and proper and timely construction maintenance and repair work.

Building reconstruction and repair technologies are important steps in a building's life cycle that allow to extend a building's life span, to improve the conditions of structures, to create a better internal and external environment, and reduce building energy costs. Building renovation and repair technologies allow to reduce construction and operating costs.

Building Information Modeling (BIM) is a collaborative approach, based on digital technology, that opens up more efficient design methods (Bryde *et al.* 2013). Computer model with multiple dimensions can be used to effectively manage information throughout the project lifecycle – from the early concept of activity (Jung, Joo 2011). BIM-based processes are key to new buildings and infrastructure and have the potential for reconstruction/renovation projects using additional workflows such as laser scanning and rapid analysis of energy, economics and eco-efficiency (Barlish, Sullivan 2012; Lee *et al.* 2015). Although BIM processes are designed for new buildings, most existing buildings are not yet maintained, renovated, or deconstructed using BIM (Merschbrock, Figueres-Munoz 2015). Volk (Volk *et al.* 2014) presents a review of more than 180 recent publications on the topic. The results show poor implementation of BIM in existing buildings (Gu, London 2010).

In this context, BIM technology creates synergies for the construction, energy and software industries (Fan *et al.* 2014). Various subsystems are implemented in the current BIM, e.g. the cost of construction can be calculated on the basis of the designed building model, the same system can be used for scheduling, quantities of existing material can be calculated, and so on. (Migilinskas *et al.* 2013). Despite the rapid advancement and dissemination of standards, opportunities for research on challenges arise from process automation and application of BIM to existing buildings.

2. Modernization model of public buildings using energy efficiency principles and building information modeling technology

In the task of modernization of public building, all processes, from the determination of the energy class of the existing building to the application of modern technologies and the analysis of selected modernization options, must be evaluated.

In order to maximize the automation of modernization processes, the following processes should be envisaged:

Numerical models are used in the analysis of the buildings, where precise technical parameters are required (Li Yang 2014). Laser scanning is recommended to reduce data conversion to digital objects. This method accurately replicates the model of the real building in a short period of time with the low labor costs. However, modern technology goes even further where it is not even necessary to have extremely expensive devices in order to create a fairly accurate digital model. It only requires the use of digital cameras. This kind of reality capture is called photogrammetric capture. Photogrammetry is often used to create realistic scaling of objects using a large number of overlapping or overlapping photos (Altaweel, M. 2016).

Fixed building structures are evaluated by experts and the most influential structures are identified for damages. Only after assessing the physical condition of the structures and the real energy class of the building the data can be associated with a digital model.

Virtual representation of reality in digital format by creating the model of an object, helps both the designer and other contractor to be involved in building modernization by shearing the common information. The digital model of the structure facilitates its manipulation by applying different constructions using the database. The development of such a model and the application of the classified attribute information provides the basis for the principles of BIM technology adoption. Classified digital information not only facilitates easy application of information change in the model, but also helps to obtain reliable and definite report of the material quantity at any time, which is easily linked to the price database of certain systems. The stored information in the model can not only be the geometric parameters but also information of the thermal parameters and existing energy systems.

BIM model facilitates automated energy simulation. The main purpose of this simulation and modeling is to determine the main characteristics of building construction and engineering system (heating, ventilation, power supply, etc.). Where the input data is: scanned building structures, classified information from the BIM model of the building being created, and the energy class of the building after upgrading would be sought as additional information.

According to the required strategy of the EU countries that by 2020 carbon dioxide emissions should be reduced by 20% by the year 2020 in comparison to 1990, and only 20% must come from renewable sources, it is crucial to include life cycle parameters in the evaluation of simulations. So the purpose of modeling is to analyze CO₂ reduction and heat supply of various energy devices. The main purpose of these simulations is to reduce CO₂ emissions, thereby optimizing heating costs.

Automated energy modeling in the design process would be an indispensable element in decision making and energy efficiency decision making, allowing the optimal parameters selection and the evaluation of alternative sources of heating, ventilation and air conditioning. Since this process is not automated at the moment, optimized options are being defined to achieve the desired goal. The multi-purpose solution synthesis method SyMAD-3, which is also used, determines the rational choice of the building to be upgraded.

Special design programs for the design and dynamic modeling of energy buildings are used to analyze the energy performance of buildings. This allows the heating and cooling loads to be optimized using a heat balance setting with monthly and hourly balances. A cohesive design information sharing system allows all stakeholders involved in the project (from the customer to the developer) to participate in the process. So are BIM technologies

Figure S2.1 demonstrates the breakdown of the optimization model into 2 stages:

Stage I sets out the indicators for the key elements.

In stage II the alternative solutions corresponding to the energy class are determined, using the obtained results of the stage I.

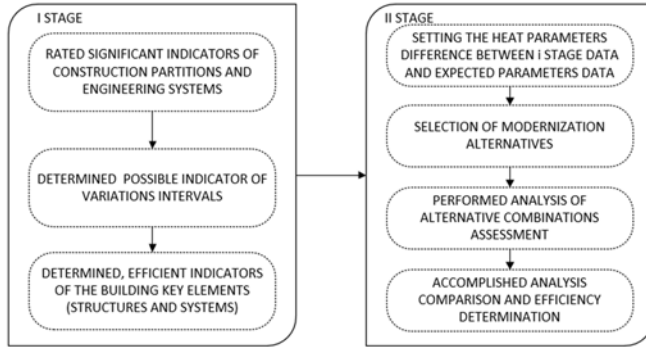


Figure S2.1. Optimization model for building modernization

Partitioning of the Stage I process:

Parameters of the building, significant indicators of variations of the partitioning structures are evaluated:

- maximum, minimum and average roof heat transfer factor – $U_{st\ max}, U_{st\ min}, U_{st0}$.
- significant range of roof heat transfer factor – ΔU_{st} ;
- maximum, minimum and average basement floor heat transfer factor – $U_{gr\ max}, U_{gr\ min}, U_{gr0}$.
- significant range of basement floor heat transfer factor – ΔU_{gr} ;
- maximum, minimum and average wall heat transfer factor – $U_{sien\ max}, U_{sien\ min}, U_{sien0}$.
- significant range of wall heat transfer factor – ΔU_{sien} ;
- maximum, minimum and average factor of windows and doors – $U_{lan\ max}, U_{lan\ min}, U_{lan0}$.
- significant range of heat transfer factor for windows and doors – ΔU_{lan} .

Significant indicators of engineering system variation are also formed:

- maximum, minimum and average efficiency of the ventilation system – $\eta_{re\ max}, \eta_{re\ min}, \eta_{re0}$;
- a significant range for the efficiency of the ventilation system – $\Delta \eta_{re}$;
- defines the source of the heating system (gas boiler, central unit, electricity and etc.) – S_{sist} ;
- defines the source of hot water preparation (gas boiler, central unit, electricity, etc.) – V_{sist} ;
- defines the source of cold air preparation (air conditioners, freezer, etc.) – O_{sist} ;
- identifying renewable energy sources – A_{sist} .

The study examined 6 factors of influence:

- roof heat transfer factor;
- heat transfer factor of basement floor (plinth);

- wall heat transfer factor;
- heat transfer factor of windows and doors;
- efficiency of the ventilation system;
- energy consumption of the premises.

The heat transfer factor of a roof is determined by 3 levels:

- lower, middle, and upper values (0.15; 0.2; 0.25);
- basement floor (plinth) heat transfer factor in 3 levels (0.25; 0.3; 0.35);
- wall heat transfer factor at 3 levels (0.2; 0.25; 0.3);
- 3 levels of heat transfer factor for windows and doors (1.2; 1.6; 2);
- 3 levels of efficiency of the ventilation system (0.7; 0.8; 0.9).

The calculation of all the factors gives the number of options equal to 243. Because of the large number of options, it is very difficult to use the analysis methods of variance, therefore the full-factor experiment methodology was used for these experiments. The basic indicator level and the ranges of options are presented in Table S2.1. The full-factor experimental planning matrix under building energy simulations of building elements is presented in Goh (1989) key indicators table. The planning matrix shows all possible combinations of lower and upper levels for each influence factor.

Table S2.1. Key indicators of the planning matrix

Indicators	Heat transfer factor of the roof $W/(m^2 \cdot K)$	Basement floor (plinth) heat transfer factor $W/(m^2 \cdot K)$	Wall heat transfer factor $W/(m^2 \cdot K)$	Window, door heat transfer factor $W/(m^2 \cdot K)$	Ventilation system efficiency factor $W/(m^2 \cdot K)$	Energy consumption of premises
Basic level	0.2	0.25	0.25	1.6	0.8	is calculated
Variation range	0.05	0.05	0.05	0.4	0.1	-

The upper limit of the heat transfer factor of the roof was adopted as 0.25 ($W/(m^2 K)$) because further increase of the heat transfer factor of the roof does not correspond to the variant of class B NRG. The lower limit was adopted as 0.15 ($W/(m^2 K)$) because the lower heat transfer factor value made the roof structure more expensive.

The upper limit of the heat transfer factor of the basement floor was adopted as 0.35 ($W/(m^2 K)$), because the further increase of the heat transfer factor of the basement floor (plinth) does not correspond to the variant of NRG class B building. The lower limit was adopted as 0.25 ($W/(m^2 K)$) because the lower heat transfer factor value increased the cost of the basement floor construction.

The upper limit of the heat transfer factor of the walls was adopted as 0.3 ($W/(m^2 K)$), because the further increase of the heat transfer factor of the walls does not correspond to the variant of the NRG class B building. The lower limit was adopted as 0.2 ($W/(m^2 K)$) because the lower value of the heat transfer factor increased the cost of the wall construction.

The upper limit of the heat transfer factor of windows and doors was adopted as 2 ($W/(m^2 K)$), because further increase of the heat transfer factor of windows and doors does

not correspond to the variant of class B NRG. The lower limit was adopted as 1.2 (W/(m²K)), because the lower heat transfer factor value increased the cost of construction of windows and doors.

The upper limit of the efficiency of the ventilation system was adopted as 0.9 (W/(m²K)) because further increase of the efficiency of the ventilation system does not correspond to the option of the NRG class B building. The lower limit was adopted as 0.7 (W/(m²K)) because the lower value of the efficiency coefficient increased the cost of the ventilation system design.

The following properties were investigated using the method of building energy simulations of building elements according to the plan (these properties became further performance indicators):

$Y1 = U_{st}$ – the heat transfer factor of the roof;

$Y2 = U_{gr}$ – basement floor heat transfer factor;

$Y3 = U_{sien}$ – wall heat transfer factor;

$Y4 = U_{lan}$ – heat transfer factor of windows and doors;

$Y5 = \eta_{re}$ – efficiency of the ventilation system;

$Y6_i$ ($i = 1, 2, 43$) = $f(U_{st}, U_{gr}, U_{sien}, U_{lan}, \eta_{re}, S_{sist}, V_{sist}, O_{sist}, A_{sist})$ – energy consumption of premises and NRG class (calculated using the above indicators, excluding options other than B class).

The Simple Additive Weighting (SAW) method is used for this matrix determination of the rationality of the options. The SAW method is most applicable due to its relatively simple application. The decision matrix is formed $X_{i,j}$ (Table S2.2).

Output data – decision matrix and levels of significance. The solution matrix cannot have non-numeric values. Here's how it works:

1. matrix is being normalized;

2. each member of the same version of the normalized matrix is multiplied by its significance and added to the other members of the alternative (row). The resulting amount is divided by the sum of the weights (significance). The input data is the decision matrix and the significance of each performance indicator, who must satisfy the condition (Churchman, Ackoff 1954):

Table S2.2. Decision making matrix (A annex)

Alternatives to variation	Indicators (heat transfer factors)					Energy costs kWh/m ² ×years
	Roof	basement floor	Walls	Windows, Doors	Ventilation system	
1	$U_{st\ min}$	$U_{gr\ min}$	$U_{sien\ min}$	$U_{lan\ min}$	$\eta_{re\ min}$	$Y6_1$
2	U_{st0}	$U_{gr\ min}$	$U_{sien\ min}$	$U_{lan\ min}$	$\eta_{re\ min}$	$Y6_2$
...						
min. ar max. indicator	min	min	min	min	max	min
Significance of the indicator	1	1	1	1	1	1

The solution matrix members are normalized by this formula if the matrix members are maximized:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{max}}, \quad (S2.2)$$

If the members of the decision matrix are minimized, the calculations are performed according to the following formula:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_j^{min}}{x_{ij}}, \quad (S2.3)$$

here x_{ij} – members of the decision matrix; \bar{x}_{ij} – members of the normalized matrix; i – an alternative; m – number of alternatives; j – indicator; n – number of indicators; x_j^{max} – maximum value of the indicator; x_j^{min} – the minimum value of the indicator; q_j – integrated materiality.

The second stage determines by what means (design solutions) the solution, defined in the first stage, can be achieved. Criteria for alternative retrofitting measures are established by the experts together with the owner of the building. Using pair-comparisons, experts determine criteria for sizes and weights.

Alternative combinations of modernization measures are developed using the decision tree model. This model identifies possible combinations of insulation for the caps, walls and roof. Combinations may have several options. It is proposed for the method of evaluation of multi-criteria alternatives to be selected using the SyMAD-3 method, which allows to choose the most efficient option among the created alternatives. Many alternative combinations are generated applying the decision tree principles, and using the list of sequence of the alternative priorities. The energy demand analysis of the alternative combinations used in the retrofit will influence the energy cost of the building. Thus, only the decision-maker chooses the best alternative that satisfies the values of the efficiency indicators (energy cost, price, etc.).

The pair-comparison method determines the significance of the efficiency of the indicators. The optimization problem determines numerical values of subjective significance of indicators.

The information collected is systematized using pair-comparison matrices. Significant and prioritized indicators were determined for each building component. A method of determination of the significance of the indicators are presented in the book of Ustinovich and Zavadskas (Ustinovich, Zavadskas 2004).

The indicators chosen to determine the efficiency of the modernization of the building are presented in Annex C. The indicators selected for the modernization of the public building are: heat transfer coefficient (W/m^2K); the cost of retrofitting (EUR); estimated lifetime of the instrument (year); possibility to perform construction work regardless of seasonality (by points); annual savings ($kWh/m^2/year$); simple payback time (year); thickness of the structure (mm).

The selection of the most optimal alternatives from all available (from the relevant information on the criteria) is the decision-making process. The decision-making process for this work is based on the multi-objective solution synthesis method – SyMAD-3 (Simanavičienė *et al.* 2012). Multi-objective decision-making methods (three) based on quantitative measurements are used to increase the reliability of the resulting solution.

The purpose of the SyMAD-3 method is the synthesis of multi-objective solutions where three multi-objective solutions are used (Simanavičienė *et al.* 2012; Simanavičienė *et al.* 2014). The decision analysis structure is represented as a multilevel decision tree (2.17)

Having a solution analysis model and the necessary data start the process of rational decision making can be started, i.e. by selecting the appropriate algorithm, the alternatives in question are sorted by rationality - SyMAD-3. The algorithm of the presented method consists of II stages.

Solution phase I is for task formulation, computational data preparation and initial evaluation of alternatives. This phase consists of six steps:

- Identifying decision steps, performance indicator systems for each decision tree step $K = \{k\}$, ($k = 1, 2, \dots, c$) formation. Compilation of decision tables for each decision step, here m_k – the number of decision tables in the k -step. Using these data tables, decision matrices are formed:

$$X_t = [x_{ij}^t], (t = \overline{1, m_k}; i = \overline{1, a_t}, j = \overline{1, n_k}), \quad (S2.4)$$

here t – solution table number, a_t – t number of alternatives to that decision table, n_k – k - number of performance indicators for that step.

- Filling in expert pairing comparison matrices used to determine the significance of performance indicators.

The complete method of classical pair-comparison is presented in Ustinovich and Zavadsk book (Ustinovičius, Zavadskas 2004).

- Determining the coherence of pair-comparison matrices. For this, each matrix is sampled, and its degree S of compatibility is calculated. If $S < 0.1$ – the matrix coherence is sufficient and the matrix is used to determine the subjective significance of the variables, if no – matrix data is not used for further calculations (Saaty 1994).
- Determining the significance values of k indicators. Using subject-filled matrix pair-comparison matrices and the least-squares method, the subjective significance of the indicators is calculated. On the basis of the information on the subjective significance of the indicators, the concordance between the expert opinions on the significance of the indicators is verified by calculating the concordance coefficient. If there is sufficient agreement among experts on the significance of the indicators, the values of the integrated significance of the indicators are calculated below. The calculation of the indicators is repeated with the data of the updated expert group.
- Using the above concluded decision matrices and the values of the integrated significance of indicators, the rationality of alternatives are determined by three methods: TOPSIS, SAW, COPRAS.
- Calculations for all three methods provide results in the form of relative significance criteria for the TOPSIS, SAW, and COPRAS methods, without summing:

$$(A_k^i [TOPSIS, SAW, COPRAS]) = (R_{kT}^i, R_{ks}^i, R_{kc}^i), \quad (S2.5)$$

$$k = \overline{1, c}, i = \overline{1, m_k}.$$

The II decision making phase is intended for alternate combinations' designing and evaluating their rationality. Using the results of the rationality assessment of the alternatives obtained in the decision making phase I and described in the solution tables the solutions tree model, alternative combinations are made.

Phase II consists of three steps:

- Alternate combination data is presented in vector form:

$$B_s = \{(R_{1,T}^i, R_{1,S}^i, R_{1,C}^i), \dots (R_{c,T}^i, R_{c,S}^i, R_{c,C}^i)\}, i = \overline{1, m_k}, k = \overline{1, c}, \quad (S2.6)$$

- The solution tables are filled with the alternatives obtained and these data will be used later in the subsequent calculations.
- Evaluation of alternative combinations (TOPSIS, SAW, COPRAS). A matrix of solutions is created:

$$Y = [B_s] = [y_{sl}], s = \overline{1, z}, l = \overline{1, k \times mt}, \quad (S2.7)$$

where mt – number of methods used, k – step number, ($k = 1, 2, \dots, c$). In this case s – matrices Y number of rows, l – matrices Y number of columns.

$$(y_{sl}) = (R_{ij}^{kl}), k = \overline{1, c}, i = \overline{1, m_k}, l = \overline{1, k \times mt}, \quad (S2.8)$$

The indicators needed in the matrix are formed Y for the evaluation of the alternatives presented, set: $R = \{R_l\}$, ($l = 1, 2, \dots, k \times mt$).

The optimum value of this indicator is the maximum and their significance values are also affected by neither subjective nor objective factors. The significance values of the indicators must satisfy the condition:

$$\sum_{l=1}^{k \times mt} w_l = 1, \quad (S2.9)$$

where k – number of steps, mt – number of methods.

Table S2.3. Alternative combinations decision table

Steps	I level			...			c levels		
Indicators	R _[1]	R _[2]	R _[3]	...	...	...	R _[7]	R _[8]	R _[9]
Alter-natives									
B₁	$R_{1,T}^{1_1}$	$R_{1,S}^{1_1}$	$R_{1,C}^{1_1}$	...	...	...	$R_{c,T}^{1_t}$	$R_{c,S}^{1_t}$	$R_{c,C}^{1_t}$
...
B_z	$R_{1,T}^{a_t}$	$R_{1,S}^{a_t}$	$R_{1,C}^{a_t}$	...	...	...	$R_{c,T}^{a_t}$	$R_{c,S}^{a_t}$	$R_{c,C}^{a_t}$
Min/max	Max	Max	Max	...	...	...	Max	Max	Max

The rationality of the options are determined by the simple constituent SAW method (MacCrimmon 1968).

After evaluating the alternate combinations using the above methods, the rationality estimates of the alternative combinations and the rankings (ranked) of the alternative combinations for each method are presented in the form of a table (Table S2.3). The presented method can be used to solve various multi-level, multi-objective decision-making tasks, when information about alternatives is presented in quantitative form (Fig. S2.3). In this case, the SyMAD-3 method is used for the analysis and synthesis of external wall installation solutions.

The algorithm of this method uses calculations of multi-objective decision making COPRAS (Zavadskas, Kaklauskas 1996), TOPSIS (Hwang, Yoon 1981) and SAW (MacCrimmon 1968).

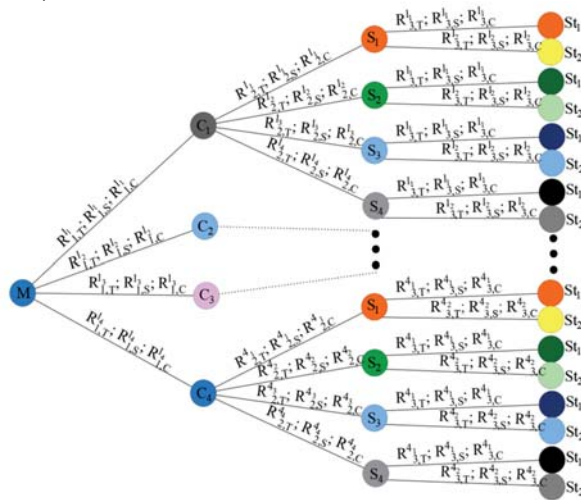


Fig. S2.3. A fragment of decision tree used for selection of alternative combinations of modernization measures, using the data from Table S2.3. Where: M – modernization option, C_n – plinth option, S_n – wall option, St_n – roof option.

The rationality of the option is determined when the members of the normalized matrix are multiplied by significance and summed. The sum of rational options will be maximum.

3. Application of the created modernization model to the public building

This section examines a selected real building that needs modernization due to the depreciation. The evaluation of the efficiency of options and solutions for the modernization of public buildings is applied to this building and is described in subsection 2.7 of this work. The main parameters of the partition structures determined during the audit of the analyzed building and their depreciation are presented. To facilitate

the building inventory work, a photogrammetric 3D model was created from a combination of captured photographs (with a simple camera and a drone). Significant indicators of elemental energy simulation were formed. Indicators of the most effective variation options were determined by applying the decision-making matrix and normalizing the matrix indicators. Optimization model for existing building is applied, taking into account the differences in missing characteristics of the construction provided for modernization. Possible options of modernization of structures were evaluated by assessing: heat transfer factor, cost of modernization, lifetime of the projected measure, possibility to perform construction works irrespective of seasonality, annual savings, payback time, thickness of structure.

The building that needed modernization was selected for this modernization model to be tested. Building title: Maneuver Dispatcher Post Boksto str. 13, in Radviliskis. This modernization of the building would be included in the group of special structures for design work (STR 1.01.03: 2017 Classification of structures). Existing building total area: 1455.73m². This building is for administrative purposes and it is planned to carry out the following works: redesign of premises, repairs of indoor space, improvement of energy performance of building, external insulation of building, replacement of engineering systems of heating and ventilation. The 4-storey building is constructed of sand-lime bricks and is not insulated. The interior decoration is morally and technically worn out. Internal heating ventilation engineering systems do not meet the requirements. The building was built in 1971 by the Vilnius branch of the Institute Želdorprojekt Vilnius. No technical details have been retained for the technical work project prepared, as might have been expected. The last renovation of this building was completed in 1998.

Since the building was old and almost no information of the material used to construct the building exist, an inventory of the building and its real condition had to be made. The data of the existing building can be collected by laser scanners, thermographic cameras, which will automatically provide information on thermal insulation of the building, location of thermal bridges, fractures in the building structure, ventilation and air conditioning or heating. The 3D model of 1000 photos was made, analyzing the current situation, analyzing the current energy performance in caps, roofs and exterior walls. All the calculations and the results are showed in annex A.

General conclusions

After generalizing the results of the dissertation, it is possible to state that:

1. The analysis has shown that the use of new technologies must be considered at the design stage.
2. An analysis of the application of BIM technology has shown that this technology is mainly used for the construction of new buildings but not for the modernization of old buildings as there is no method developed how to do it.
3. It has been found that information from photogrammetric three-dimensional digital model can be used for the modernization model of old public buildings.

4. Optimization algorithm of public building modernization model based on BIM technology was developed. It has been estimated that this method allows for a faster and more accurate selection of the most efficient modernization option that also meets the requirements for cost-effective and sustainable buildings.
5. Analysis of created photogrammetric building model showed that higher accuracy of measured parameters of exterior walls, windows and roof can be achieved, as well as time saving, as data can be updated remotely. The accuracy of this model is sufficient to be used by the designer in developing the BIM model and can be used as a primary source of information for the building modernization modeling.
6. The audit of the building has shown that it is necessary to assess the heat transfer coefficient of the building's internal and external structures in order to select suitable modernization option. Such an assessment is necessary for each building which is need to be modernized, as the deterioration of the structures are different for each building.
7. Public building modernization model technology has been developed, which is based on multi-criteria analysis using variant tree synthesis method. Using a combination of modernization tools, modernization decision-making model was developed. It has been found that this model can guarantee the reliability of the results and the efficiency of the chosen modernization option.
8. After checking the developed method of modernization optimization algorithm, it was found that the advantage of this method for finding the most efficient modernization option is to use it automated way. The analysis of the results was determined that the proposed approach has a disadvantage – a lot of data must be entered manually to computing systems.

Priedai*

A priedas. Radviliškio manevrinio dispečerinio posto (Bokšto g. 13), Radviliškyje pastato tyrimo ataskaita

B priedas. Autorės sąžiningumo deklaracija

C priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijoje skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

D priedas. Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

*Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Jovita Starynina

MODERNIZUOJAMŲ VISUOMENINIŲ
PASTATŲ ENERGIJOS VARTOJIMO EFEKTYVUMO
DIDINIMAS TAIKANT DARNIUS PROJEKTAVIMO METODUS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (T 002)

ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT
IN MODERNIZATION OF PUBLIC BUILDINGS
USING SUSTAINABLE DESIGN METHODS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (T 002)

2020 01 16. 12,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius